الفيزياء العملية (4)

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

منشورات جامعة دمشق
كلية العلوم

الفيزياء العملية 4

الدكتور فوزي غالب عوض
أستاذ في قسم الفيزياء

الدكتورة سهام الطرابيشي
أستاذ في قسم الفيزياء

رولا أبو سمرة

نورس الهلامي

محمد مروان الراعي

محمد الأخرس

جامعة دمشق

1439 – 1440
2017 – 2018

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفهرس

رقم التجربة	عنوان التجربة	رقم الصفحة
	مقدمة المؤلفين	5
	تذكرة بالدراسة البيانية لتوابع الاهتزازات المتخامدة	9
	أولاً: التجارب الأساسية	
1a	النواس المركب المتناظر (الحركة الاهتزازية لجسم صلب حول محور)	15
1b	النواس المتغير الميل	23
2	عزوم العطالة	27
3	نواس كاتر العكوس	37
4	الحركة الدورانية لجسم صلب حول محور ثابت	45
5	الجيروسكوب: الحركة الدورانية لجسم صلب حول نقطة	63
6	قياس معامل المرونة الطولاني (ثابت يانغ)	71
7	ميزان الفتل ونواس الفتل	77
8	حلقات نيوتن (تداخل الأمواج الكهرطيسية)	83
9	تجربة ملد: الأمواج المستقرة العرضانية في بعد واحد	89
10	النواسان المترابطان	95
11	الدارات الكهربائية المترابطة بالسعة	117
12	الدارات الكهربائية المترابطة تحريضياً	123
13	انضمام حركتين جيبيتين متعامدتين في المنحى	133
14	مفعول دوبلر	137
15	نواس الفتل الحلزوني الاهتزازات الحرة والمتخامدة	165
16	نواس الفتل الحلزوني-الاهتزازات القسرية	175
17	ميزان الفتل الثقالي (ميزان كافانديش)	185
	ثانياً: تجارب للإراءة: الأمواج المائية	
	حوض الأمواج والستروبوسكوب ذو المحرك	219
18	توليد أمواج دائرية وأمواج مستقيمة	227
	المصطلحات والمراجع واللجنة العلمية	233

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

مقدمة المؤلفين

أُعِدَّ كتاب "الفيزياء العملية 4" ليكون رديفاً للكتاب النظري الاهتزازات والأمواج من وجهة نظر التجارب العملية، ومكملاً له من وجهة نظر المبادئ الفيزيائية. يغطّي هذا الكتاب ست ساعات أسبوعية ويتناول عدداً وافراً من تجارب الاهتزازات والأمواج الميكانيكية والكهربائية والكهرطيسية.

وقد أضفنا إلى هذا الكتاب تذكرة بالدراسة البيانية لتوابع الحركات الاهتزازية المتخامدة قبل البدء بإجراء التجارب تهدف إلى تكيف الطالب مع استخدام الورق اللغارتمي في حساب برامترات الظواهر الطبيعية المتخامدة عموماً (كتخامد ظاهرة النشاط الإشعاعي بدلالة الزمن أو بدلالة البعد) والحركات الاهتزازية المتخامدة بشكل خاص (كتخامد اهتزاز نواس الفتل الحلزوني)، آخذاً مقياس الرسم في الحسبان، والتحويل من اللغارتم الطبيعي إلى العشري وبالعكس حتى يتمكن من حساب البرامترات حساباً صحيحاً.

ولقد حرصنا في مستهل كل تجربة أن نقدم لها بتمهيد نظري يلخص المبادئ التي تعتمد عليها والتي فُصِّلَت في الكتاب النظري. وحرصنا أيضاً أن يكون تمهيد التجارب المشتركة في موضوع معين مشتركاً نرجع إليه حين الحاجة. فقد قدمنا في التجربة الأولى "النواس المركب المتناظر" تمهيداً يعتمد على عدد من التجارب التي تتناول الحركة الاهتزازية الدورانية للجسم الصلب. تعالج التجارب 1a و1b و2 و3 (النواس المركب المتناظر والنواس المتغير الميل وعزوم العطالة ونواس كاتر) الحركة الاهتزازية، ويمكن من خلال الأولى والثالثة استنتاج تسارع الجاذبية الأرضية ومن الثانية استنتاج عزم إرجاع نابض حلزوني. في حين تعالج التجربة 4 الحركة الدورانية المستوية. ثم تأتي تجربة الحركة الجيروسكوبية 5 لتشمل كلاً من عزوم العطالة والحركتين الاهتزازية والدورانية حول نقطة. تبدأ التجربتان 6 و7 (ثابت يانغ ونواس الفتل) بمعالجة الأمواج (موجة المرونة في الحالة الأولى وموجة الفتل في الحالة الثانية)، واستنتاج معامل المرونة (الصلابة) الطولاني لمادة السلك في الحالة الأولى ومعامل المرونة (الصلابة) العرضاني (معامل القص) وثابتة فتل السلك في الحالة الثانية. أما التجربتان 8 و9 (حلقات نيوتن وتجربة ملد) فتتناولان دراسة انضمام موجتين إحداهما واردة

والأخرى منعكسة بعد أن تعاني انعكاساً في الطور (ولو أن التجربة الأولى تتعامل مع الأشعة الكهرطيسية والثانية مع الأمواج الميكانيكية). من خلال التجارب 10 و11 و12 و13 (النواسان المترابطان والدارات الكهربائية المترابطة بالسعة والدارات الكهربائية المترابطة تحريضياً ومنحنيات ليساجو) ندرس الظواهر المختلفة لانضمام الحركات الاهتزازية التي يمكن أن تختلف بتواتراتها وقد يكون لها المنحى نفسه في التجارب الثلاث الأولى أو تكون متعامدة في المنحى كما هو الحال في التجربة الرابعة (منحنيات ليساجو)، وهي ميكانيكية في النواسين المترابطين وكهربائية في حالة الاهتزازات المترابطة بالسعة والمترابطة تحريضياً وفي منحنيات ليساجو. أما التغير الظاهري في تواتر منبع للأمواج (ميكانيكية أوكهرطيسية) عندما يكون في حالة حركة نسبية بالنسبة لمستقبل فندرسه من خلال تجربة مفعول دوبلر رقم 14 التي تتناول الأمواج فوق الصوتية حصراً في مختبرنا، ويمكن أن تستخدم هذه التجربة كتطبيق على قياس سرعة الصوت. وأما التجربتان 15 و16 فتتناولان دراسة نواس الفتل الحلزوني: الاهتزازات الدورانية الحرة والمتخامدة (15) والاهتزازات القسرية والتجاوب (16)، وأما التجربة (17) فتتناول دراسة اهتزازات الفتل الثقالية بالاعتماد على نواس الفتل لكافانديش.

أخيراً يتناول الكتاب أيضاً بضعة تجارب تعالج بعض ظواهر أمواج السطح المائية، التي يمكن رؤيتها بالعين المجردة، بالاستعانة بحوض مائي والستروبوسكوب. ويعد إجراء هذه التجارب خطوة لابد منها لإدراك الظاهرة المقابلة لها في الإشعاعات الكهرطيسية، حيث تتعامل مع أطوال موجية قصيرة للغاية.

لا يسعنا هنا نحن معدّي هذا الكتاب إلاّ أن نتقدم بوافر الشكر لطلابنا الأعزاء الذين بتفاعلهم مع المادة العلمية لكتاب الفيزياء العملية 4 (الطبعة الأولى) لفتوا انتباهنا إلى ثغراته، كما نتوجه بالشكر الجزيل لزملائنا الذين مدوا لنا يد العون في إجراء التعديلات على الكتاب وتلافي الأخطاء التي وردت فيه ونذكر منهم طالبات الماجستير قمر عميش وساندي العمري ومنال أبو شريف وطالب الماجستير محمود الأصفر.

أخيراً نرجو أن يحقق هذا الكتاب الفائدة المرجوة لطلابنا الأعزاء، والله من وراء القصد.

المؤلفون

تذكرة بالدراسة البيانية لتوابع الحركات الاهتزازية المتخامدة

نصادف في الحياة العملية الكثير من الظواهر الاهتزازية المتخامدة في مجالات الفيزياء والكيمياء وغيرها، ويطلب إلينا دراسة هذه الظواهر، كأن يطلب منا معرفة ثابت تخامد سعة الاهتزاز مثلاً أو مقدار التخامد في واحدة الزمن أو مقدار التخامد في الدورة الاهتزازية الواحدة. ولإجراء ذلك يتطلب الأمر إتقان التعامل مع الواحدات الفيزيائية والأوراق الملمترية واللغارتمية ونصف اللغارتمية. حيث تكون تدريجات الورقة الملمترية متساوية فيما بينها سواء على المحور الشاقولي أو الأفقي. وتتبع المسافات بين التدريجات على الورقة اللغارتمية سلماً لغارتمياً على المحورين الشاقولي والأفقي. أما في حالة الورقة نصف اللغارتمية، فتدريجات المحور الشاقولي فيها تتبع سلماً لغارتمياً، في حين أن تدريجات السلم الأفقي متساوية فيما بينها.

في حالة الرسم على الورق الملمتري يتخذ المحور الأفقي للمتحول والمحور الشاقولي للتابع. يجري تقسيم المحاور إلى مقادير متساوية بحيث تشمل معظم قيم المتحول والتابع. فإذا كان تغير مواقع النقاط الممثلة بالرسم خطياً، ويطلب حساب ميل المستقيم الذي يمثلها، فإنه يتم اختيار نقطتين بعيدتين ما أمكن فيما بينهما حتى تكون دقة القياس أعلى ما يمكن. وعندما يعبر الرسم عن ظاهرة فيزيائية يجب إرفاق الميل بالواحدة التي يقدر بها.

نحتاج في دراستنا للظواهر الفيزيائية في معظم الأحيان إلى الرسم على الورق اللغارتمي أو نصف اللغارتمي لسهولة وسرعة الحصول على برامترات تخص ظواهر طبيعية معينة، وفي حالتنا نذكر على سبيل المثال لا الحصر نواس الفتل الحلزوني الذي يترك يهتز حراً بعد إزاحته بزاوية معينة، حيث يطلب مثلاً قياس ثابت تخامد النواس الذي يمثل تخامده في واحدة الزمن، والتخامد اللغارتمي الذي يمثل تخامد النواس في الدورة الواحدة، وللقيام بذلك لا بد من تذكر بعض خصائص اللغارتمات.

يتضمن الجدول التالي أربعة أعمدة. يتضمن العمود رقم 1 مجموعة من الأعداد، ويتضمن العمود 2 اللغارتمات الطبيعية للأعداد المقابلة، والعمود 3 اللغارتمات العشرية لهذه الأعداد،

والعمود 4 التدريبات التي يجب على الطالب القيام بها. يلي الجدولَ مثالٌ عمليٌّ يستخدم فيه الرسم على الورق الملمتري والورق نصف اللغارتمي على السواء.

1	2	3	4
N	اللغارتم الطبيعي	اللغارتم العشري	الإجراءات التي يجب القيام بها
1	0	0	1. انسب اللغارتم الطبيعي لأي رقم إلى اللغارتم العشري الموافق، ماذا تجد؟
2	0.69314718	0.30102999	
2.71828182	1		2. كرر العملية على أرقام أخرى .. ماذا تجد؟ ما هو عامل التحويل من اللغارتم الطبيعي للغارتم العشري؟
3	1.09861228	0.47712125	
4	1.38629436	0.60205999	
5	1.60943791	0.69897000	3. ما الأعداد التي تكون لغارتماتها العشرية أعداداً صحيحة؟ ما العلاقة التي تربط فيما بينها؟
6	1.79175946	077815125	
7	1.94591014	0.84509804	4. ما الأعداد التي تكون لغارتماتها الطبيعية أعداداً صحيحة؟ ما العلاقة التي تربط فيما بينها؟
7.38905610	2		
8	2.079441542	0.90308999	5. قارن بين اللغارتم العشري للعدد 2 واللغارتم العشري للعدد 20، ما الفرق بينهما؟
9	2.19722457	0.95424251	
10	2.30258509	1	6. كرر العملية السابقة نفسها من أجل العددين 3 و30 ، و4 و40، و5 و50 وهكذا.. ماذا تستنتج؟
11	2.39789527	1.04139268	
12	2.48490665	1.07918125	7. لديك في كتابك ورقتان نصف لغارتميتان يتبع المحور الشاقولي في إحداهما سلم اللغارتمات العشرية (الشكل2) ويتبع في الأخرى سلم اللغارتمات الطبيعية (الشكل3).
13	2.56494936	1.11394335	
14	2.63905733	1.14612804	
15	2.70805020	1.17609126	
16	2.77258872	1.20411998	8. تعرف على نوعي التدريج من خلال ما يلي:
17	2.83321334	1.23044892	مثال عن اللغارتمات العشرية
18	2.89037176	1.25527251	Log2/log1.5=0.301029995/0.954242509
19	2.94443898	1.27875360	=0.315464876
20	2.99573227	1.30103000	
20.0855369	3		
30	3.40119738	1.47712125	9. قس المسافات المقابلة على الورق المدرج وفق اللغارتمات العشرية، وقارن بين الحساب والقياس.
40	3.68887945	1.60205999	
50	3.91202300	1.69897000	مثال عن اللغارتمات الطبيعية
54.5981500	4		Ln2/Ln1.5= 0.69314718/0.405465108
60	4.09434456	1.77815125	=1.709511290
70	4.24849524	1.84509804	
80	4.38202663	1.90308999	
90	4.49980967	1.95424251	10. قس المسافات المقابلة على الورق المدرج وفق اللغارتمات الطبيعية، وقارن بين الحساب والقياس.
100	4.60517019	2	
101	4.61512052	2.00432137	

يخضع نواس الفتل الحلزوني في اهتزازه الحر للعلاقة $\theta(t)=\theta_0\, e^{-\gamma t}\cos\omega t$، حيث ω التواتر الزاوي لحركته الاهتزازية. و $\theta_n=\theta_0 e^{-\gamma t}$ سعة اهتزاز النواس التي تتخامد بدلالة الزمن، حيث θ_0 سعة الاهتزاز لحظة بدء القياس، θ_n السعة ذات الرقم n، γ ثابت التخامد الأسي والذي يمثل التخامد في واحدة الزمن. تجد في الجدول إلى اليسار البيانات الخاصة بسعة الاهتزازات الحرة لنواس الفتل الحلزوني بدلالة الزمن والمطلوب:

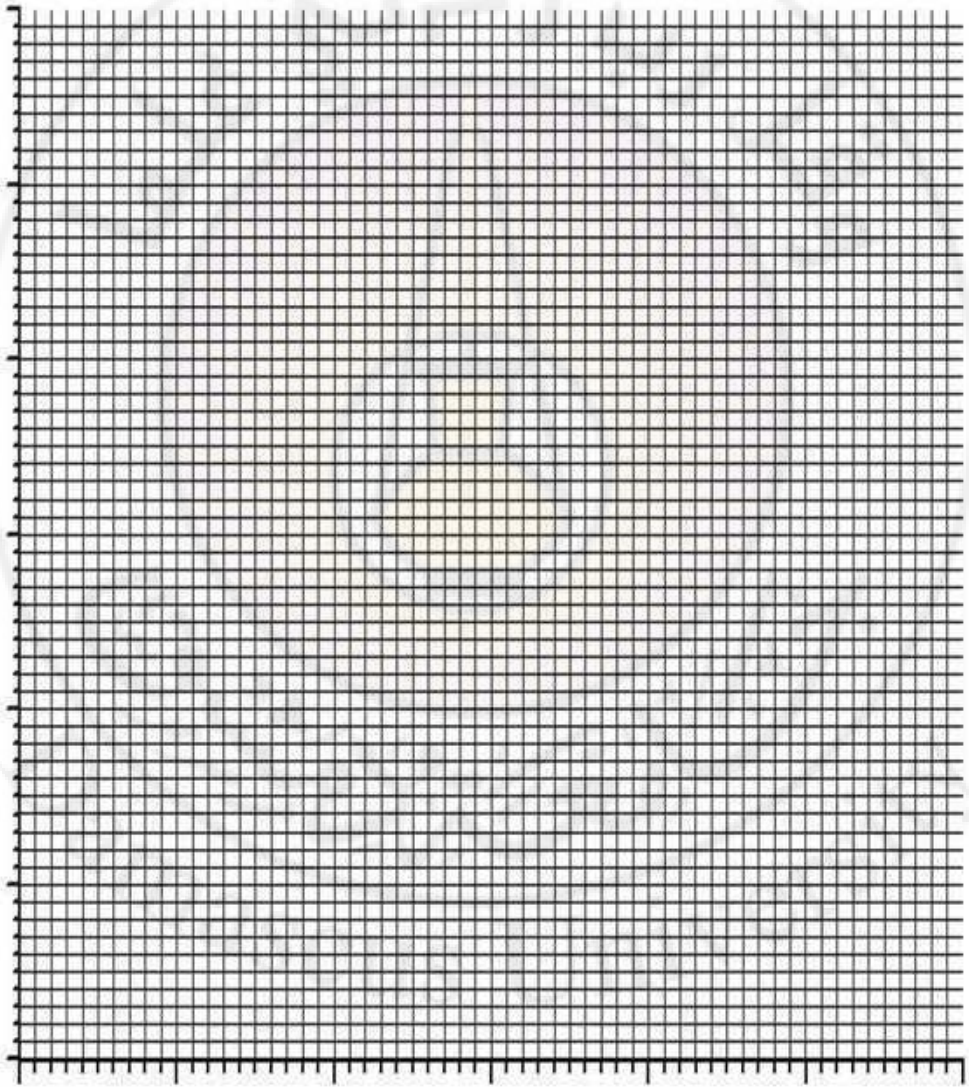
t(s)	θ_n	$\mathrm{Ln}\,\theta_n$	$\mathrm{Log}\,\theta_n$
0.0	20.2	3.006	1.305
1.8	17.2	2.844	1.236
3.6	14.5	2.674	1.161
5.3	12.3	2.510	1.090
7.2	10.4	2.342	1.017
10.8	7.5	2.015	0.875
14.5	5.3	1.668	0.724
16.3	4.5	1.504	0.653
18.2	3.8	1.335	0.580
20.0	3.2	1.163	0.505
21.9	2.7	0.993	0.431
23.8	2.2	0.788	0.342
25.6	2.0	0.693	0.301

1- تمثيل هذه البيانات على ورقة ملمترية، حيث يمثل الزمن على المحور الأفقي، بحيث يؤخذ دور الاهتزاز للسهولة كواحدة للزمن، ويؤخذ اللغارتم الطبيعي للسعة من الآلة الحاسبة أو من الجداول اللغارتمية، ويمثل على المحور الشاقولي. يتم رسم أفضل المستقيمات الذي يمر بالنقاط التجريبية ويجري استنتاج كل من ثابت التخامد الأسي γ والتخامد اللغارتمي الذي يمثل التخامد في الدورة الكاملة $\Lambda=\gamma T$ (علماً أن T يمثل دور الحركة الاهتزازية) مع إظهار الواحدة في كل مرة.

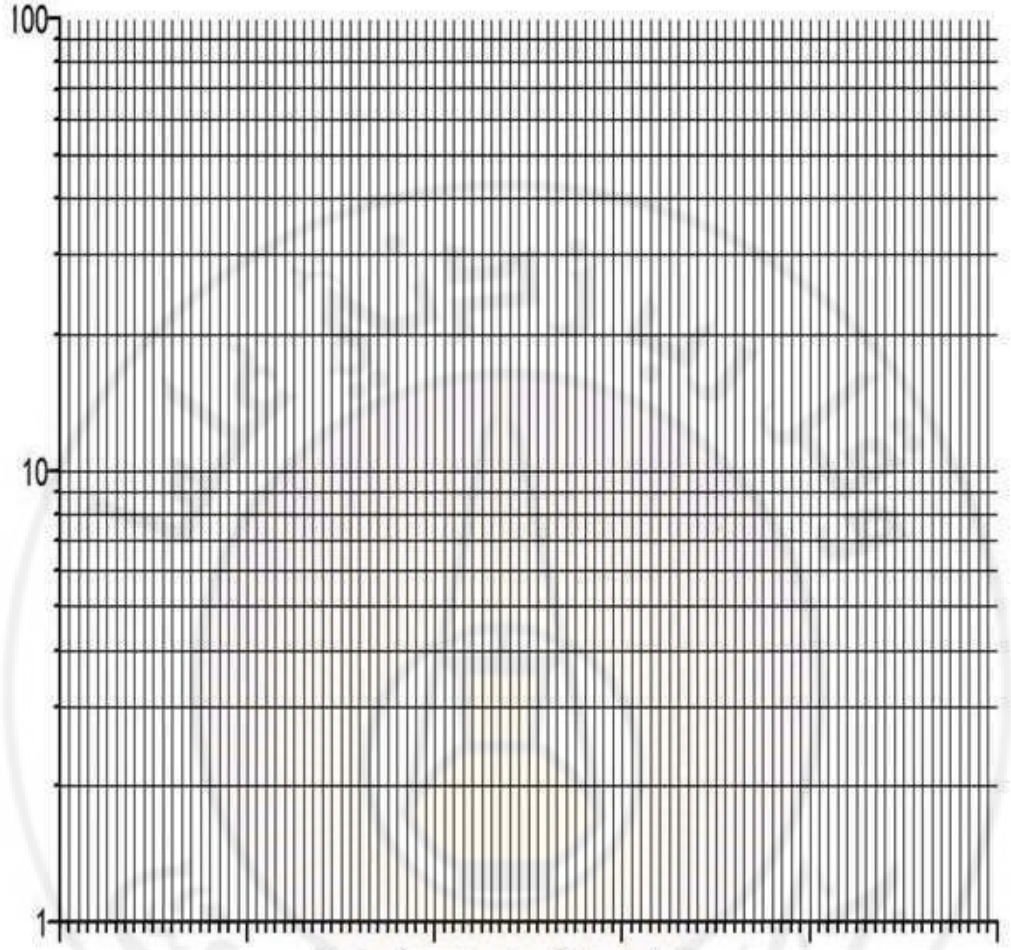
2- أعد الخطوة السابقة، ولكن باستخدام اللغارتم العشري لسعة الاهتزاز عوضاً عن اللغارتم الطبيعي، هل تحصل على النتائج نفسها؟ ما الإجراء الذي يجب القيام به حتى تحصل على النتيجة نفسها؟

3- قم بتمثيل بياناتك على ورقة نصف لغارتمية عشرية (أي تتناسب المسافات بين التدريجات على المحور الشاقولي مع اللغارتمات العشرية الموافقة)، متخذاً دور الحركة الاهتزازية كواحدة لقياس الزمن، ثم استنتج برامترات التخامد المذكورة، ارسم أفضل المستقيمات التي تمثل بياناتك، ثم احسب ميل هذا المستقيم، ولا تنسَ أن المسافات على المحور الشاقولي تمثل اللغارتمات ولا تساويها، فكيف نحصل على اللغارتمات؟ قم بما يلزم حتى تحصل على نتيجة قريبة مما حصلت عليه في الطلبين السابقين.

في الواقع لا نحصل تجريبياً، عند قياس أي مقدار فيزيائي على رقم وحيد، وإنما تكون القيمة واقعة ضمن مجال يحدده الارتياب في القياس، ويمثل ذلك بصورة عامة ضمن مستطيل الارتياب وليس بنقطة. لذلك يجب أن نناقش إمكان تمثيل الارتياب وفق المقياس المتخذ لكل من المتحول والتابع، وطبيعي أن لا يكون المقياس نفسه على كل من المحورين. إذ يمثلان عموماً مقادير مختلفة في طبيعتها.

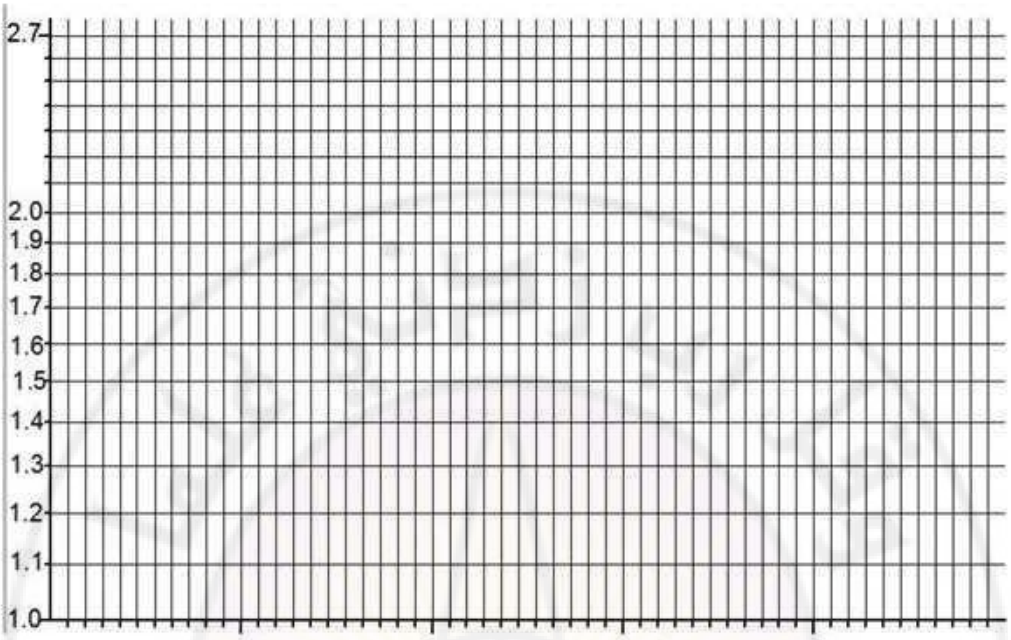


الشكل1. ورقة ملمترية



الشكل2. ورقة نصف لغارتمية عشرية

4- أعد تمثيل بياناتك على ورقة نصف لغارتمية طبيعية (أي تتناسب المسافات بين التدريجات على المحور الشاقولي مع اللغارتمات الطبيعية الموافقة)، متخذاً دور الحركة الاهتزازية كواحدة لقياس الزمن (يمكنك الاكتفاء بعدد من النقاط يتلاءم مع السلم أدناه)، ثم استنتج برامترات التخامد المذكورة، بعد رسم أفضل المستقيمات التي تمثل بياناتك، وحساب ميل هذا المستقيم، ولا تنسَ أن المسافات على المحور الشاقولي تمثل اللغارتمات الطبيعية ولا تساويها، فكيف نحصل على اللغارتمات الطبيعية؟ قم بما يلزم حتى تحصل على نتيجة قريبة مما حصلت عليه في الطلبات السابقة.



الشكل3. ورقة نصف لغارتمية، المسافات بين التدريجات فيها متناسبة مع اللغارتم الطبيعي

Damascus University

التجربة (1a)

النواس المركب المتناظر

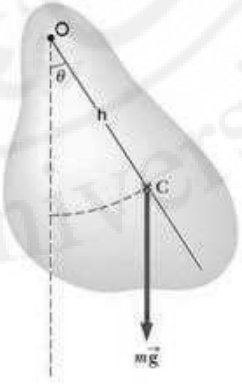
(الحركة الاهتزازية لجسم صلب حول محور)

1. هدف التجربة

دراسة النواس المركب المتناظر: تعريفه، والتحقق من قانونه، وحساب نصف قطر عطالته، وقياس تسارع الثقالة الأرضية.

2. المبدأ النظري

النواس المركب هو جسم مادي يدور حول محور ثابت لا يمر من مركز ثقله. وهو يختلف عن النواس البسيط في أن كتلة هذا الأخير تتركز في حيّز صغير (نقطة) وكتلة الخيط الذي يعلّق به مهملة، في حين تتوزع كتلة النواس المركب بشكل منتظم في كامل الحيز الذي يشغله الجسم الصلب الدائر. ولذلك تؤول دراسة حركة النواس المركب إلى دراسة حركة جسم صلب حول محور ثابت (الشكل 1).



الشكل 1

لدينا النواس المركب المبين في الشكل 1 الذي يدور حول المحور الأفقي O المتعامد مع مستوي الشكل. وليكن C مركز ثقله الذي يتعين موضعه في لحظة معينة t بالزاوية θ التي يصنعها المحور OC مع الشاقول، علماً بأن بعده عن محور الدوران ثابت وليكن h. إن القوة الخارجية الوحيدة المؤثرة في النواس هي ثقله (إذ إنّ قوة ردّ الفعل عند محور التعليق ليس لها أثر في هذه الحالة، إذ إن عزمها يساوي الصفر لمرورها من محور الدوران).

إذا أخذنا جملة إحداثية ديكارتية موجبة تعطى هذه القوة بالشكل:

$$\vec{F} = m\vec{g} = -mg\,\vec{j} \qquad (1)$$

ولكتابة معادلة حركة النواس يمكن اللجوء إمّا إلى نظرية انحفاظ الطاقة وإمّا نظرية الاندفاع الزاوي.

1) نظرية انحفاظ الطاقة

لما كانت قوة ثقل النواس $\vec{F}$ مشتقة من كمون (طاقة كامنة)، أي:

$$V = -\int \vec{F} \cdot d\vec{r}$$
$$= -\int F dy \qquad (2)$$
$$= -mgy = -mgh\cos\theta$$

فإنه لكتابة معادلة حركة النواس، يمكن استخدام نظرية انحفاظ الطاقة الكلية (في غياب الاحتكاك):

$$E_k + E_p = E \text{ (ثابت)} \qquad (3)$$

حيث E_p الطاقة الكامنة للنواس، E_k طاقته الحركية الدورانية وتساوي $\frac{1}{2}I\omega^2$ (حيث I عزم عطالة النواس حول المحور O، و ω سرعته الزاوية) ومِنْ ثَمَّ تكتب العلاقة السابقة بالشكل:

$$\frac{1}{2}I\omega^2 - mgh\cos\theta = E \text{ (ثابت)} \qquad (4)$$

ولما كانت $\omega = d\theta/dt$ فيمكن كتابة العلاقة (4) بالشكل:

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 - 2A^2\cos\theta = \frac{2E}{I} \qquad (5)$$

حيث $mgh/I = A^2$

تمثل العلاقة الأخيرة معادلة حركة النواس المركب حول المحور O. ولما كانت E ثابتة فيمكن الحصول على علاقة مكافئة للعلاقة الأخيرة، وذلك باشتقاقها بالنسبة للزمن وإعادة ترتيبها:

$$\frac{d\theta}{dt}\frac{d^2\theta}{dt^2} + A^2\sin\theta\frac{d\theta}{dt} = 0 \qquad (6)$$

ولما كان $\omega = \frac{d\theta}{dt} \neq 0$ في حالة الحركة فيمكن الاختصار على $\frac{d\theta}{dt}$ وتأخذ معادلة الحركة الشكل:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + A^2\sin\theta = 0 \qquad (7)$$

2) نظرية الاندفاع الزاوي

لدينا في هذه الحالة العلاقات الأساسية التالية:

$$\vec{\tau} = d\vec{L}/dt \qquad (8)$$

حيث $\vec{\tau}$ عزم القوة و $\vec{L}$ الاندفاع الزاوي، ومِنْ ثَمَّ يمكن أن نكتب:

$$\vec{h} \wedge \vec{F} = (h\sin\theta\vec{i} - h\cos\theta\vec{j}) \wedge (-mg\vec{j})$$
$$= -mgh\sin\theta\vec{k} \qquad (9)$$

$$\vec{L} = I\vec{\omega} = I\omega\vec{k} = I\frac{d\theta}{dt}\vec{k} \qquad (10)$$

وبدمج هذه العلاقات الثلاث نحصل على معادلة الحركة مباشرة:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + (mgh/I)\sin\theta$$
$$= \frac{d^2\theta}{dt^2} + A^2\sin\theta = 0 \qquad (11)$$

وهي العلاقة نفسها التي أوجدناها سابقاً، التي يؤدي حلها إلى معرفة الزاوية θ التي تعين وضع النواس بدلالة الزمن.

دراسة حركة النواس المركب

يمكن دراسة حركة النواس المركب من خلال

إحدى معادلتيه التفاضليتين (5) أو (7). يفضَّل استخدام العلاقة الأولى لأنها تعطي السرعة الزاوية مباشرة. تتعين E تبعاً لهذه العلاقة من شروط البدء:

$$t=0 \text{ و } \theta=0 \text{ و } \frac{d\theta}{dt}=\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_0=\omega_0 \quad (12)$$

ولقد اخترنا الوضع الابتدائي للنواس بحيث يقع مركز ثقله على الشاقول تحت محور التعليق، وذلك لتبسيط المعادلة والدراسة. فشروط البدء هذه تعني أن النواس يكون في لحظة البدء في وضع التوازن المستقر $\theta=0$ وسرعته الزاويّة الابتدائية ω_0، وهما شرطان كافيان لتعيين E من العلاقة (5) نفسها حيث نجد:

$$\omega_0^2-2A^2=2E/I \quad (13)$$

ومِنْ ثَمَّ في حالة الحركة

$$\omega^2-2A^2\cos\theta=\omega_0^2-2A^2$$

أو: $$\omega^2=\omega_0^2-4A^2\sin^2(\theta/2) \quad (14)$$

تدل هذه العلاقة على أن السرعة الزاوية ω تنعدم عندما $\theta=\theta_0$ المحدّدة بالعلاقة:

$$\sin^2(\theta_0/2)=\omega_0^2/4A^2$$

في حال تحقق المتراجحة: $\omega_0^2/4A^2\le 1$

أو $$\sin(\theta_0/2)=\pm\omega_0/2A \quad (15)$$

أي $$\theta_0=\pm 2\arcsin(\omega_0/2A) \quad (16)$$

فالزاوية θ تتأرجح إذن بين $+\theta_0$ و $-\theta_0$ والحركة عندئذ حركة اهتزازية. وإذا لم تتحقق هذه المتراجحة لا تنعدم السرعة الزاوية، وتستمر الحركة في اتجاه واحد يحدده اتجاه السرعة الزاوية الابتدائية ω_0.

حالة الاهتزازات الصغيرة السعة

في الحالة الخاصة التي تكون فيها اهتزازات النواس صغيرة السعة يمكن أن تستبدل الزاوية θ بـ $\sin\theta$ فتأخذ معادلة حركة النواس المركب الشكل:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2}+A^2\theta=0 \quad (18)$$

وهي تشبه معادلة الحركة التوافقية البسيطة، حلها العام:

$$\theta=C\sin(At+d) \quad (19)$$

حيث C و d ثابتا التكامل اللذان يتعينان من شروط البدء. ففي حالة الشروط المعطاة بالعلاقات (12) نجد:

عندما $t=0$ يكون $0=C\sin(d)$ ومن ثم

$$d=0$$

و $d\theta/dt=CA\cos(At+d)$ ومنه

$\omega_0=CA$ ومِنْ ثَمَّ: $C=\omega_0/A$

$$C=\omega_0/A=\omega_0/\sqrt{mgh/I} \quad (20)$$

نلحظ من العلاقة (19) أن الحركة دورية، وأن دورها T يجب أن يحقق العلاقة: $AT=2\pi$

أي $$T=2\pi/A=2\pi\sqrt{I/mgh} \quad (21)$$

النواس البسيط المكافئ للنواس المركب

النواس البسيط المكافئ للنواس المركب هو نواس دوره يساوي دور النواس المركب، وكتلته تساوي كتلة النواس المركب، أما طوله l فيحدد بتَساوي الدورين كما يلي: من السهل أن نستنتج معادلة النواس البسيط المكافئ من معادلة النواس المركب بملاحظة أن عزم عطالة النواس البسيط (الشكل2) يساوي $I = ml^2$. ومِنْ ثَمَّ فإن:

$$T = 2\pi\sqrt{ml^2/mgl} = 2\pi\sqrt{l/g} \quad (22)$$

وهي العلاقة التي تعطي دور النواس البسيط المكافئ.

وفي الحالة العامة حتى يتساوى الدوْران يجب أن يكون $l = \frac{I}{mh}$.

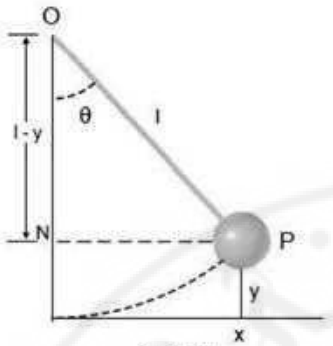
$$T = 2\pi\sqrt{l/g} = 2\pi\sqrt{I/mgh}$$

وإذا ما عرّفنا K في الحالة العامة بالعلاقة $I = mK^2$، حيث يدعى K نصف قطر عطالة النواس المركب حول محور تعليقه، نجد:

$$l = \frac{I}{mh} = \frac{mK^2}{mh} = \frac{K^2}{h} \quad (23)$$

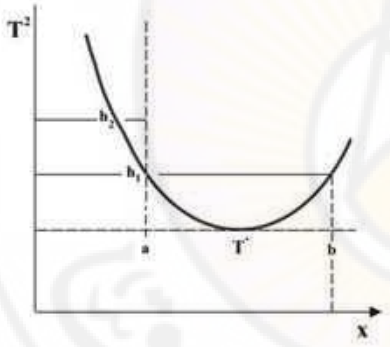
القيمة الصغرى لدور النواس المركب

إذا أمكن تغيير البعد h بين مركز ثقل النواس المركب ومحور الدوران يمر دوره



الشكل2

$T = 2\pi\sqrt{I/mgh}$، بقيمة صغرى عندما ينعدم مشتقه بالنسبة لـ h (الشكل3). إذ يتغير عزم العطالة I أيضاً تبعاً لنظرية هويغنز لعزوم العطالة، أي لدينا:



الشكل3

$$I = I_C + mh^2 = mK_C^2 + mh^2$$

حيث I_C عزم عطالة النواس حول محور مار من مركز ثقله ويوازي محور التعليق، و K_C نصف قطر عطالة النواس حول محور يمر من مركز ثقله، ومِنْ ثَمَّ يصبح دور النواس بالشكل:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{g}}\sqrt{h + K_C^2/h} \quad (24)$$

الذي ينعدم مشتقه عندما يكون: $1-K_C^2/h^2=0$، أي عندما $K_C=h$ وبالتعويض نحصل على القيمة الصغرى للدور:

$$T_m=2\pi\sqrt{2K_C/g} \qquad (25)$$

ونلْحَظُ أيضاً أن T^2 في المعادلة (24) هو حاصل جمع حدين: يتناسب الأول طردياً مع h فيمثل جزءاً من مستقيم متزايد باستمرار، ويتناسب الآخر عكسياً مع h أي يمثل جزءاً من قطع زائد متساوي الساقين ومتناقصٍ باستمرار. تمثل القيمة المحسوبة نهاية صغرى للمنحني $T=T(h)$. أما في الحالة العامة فيمكن أن نجد قيمتين لـ h (h_1 و h_2) تقابلان قيمة الدور نفسه على النحو المبين في الشكل3.

النواس المركب المتناظر

يتألف النواس المركب المتناظر من قضيب شكله متوازي مستطيلات (الشكل4)، فيه ثقوب الأبعاد فيما بينها متساوية تقريباً، ومن كتلة مركبة عليه في منتصفه. تتوزع الثقوب بصورة متناظرة تقريباً حول هذه الكتلة (ومنها التسمية). تخولنا هذه الثقوب أن نغيِّر محور الدوران، ومِنْ ثَمَّ بعده عن مركز كتلة الجسم كله (قضيب + كتلة). يُعطى دور النواس بالعلاقة (24).

وإذا اتخذنا مبدأ الفواصل أحد طرفي النواس، ولتكن النقطة A في الخط البياني المرسوم في الشكل4، (الذي يمثل العلاقة بين مربع دور النواس وموقع محور التعليق بالنسبة إلى مبدأ الفواصل)، وكان بعد مركز الثقل C عن هذا الطرف $d=\overline{AC}$، فإن:

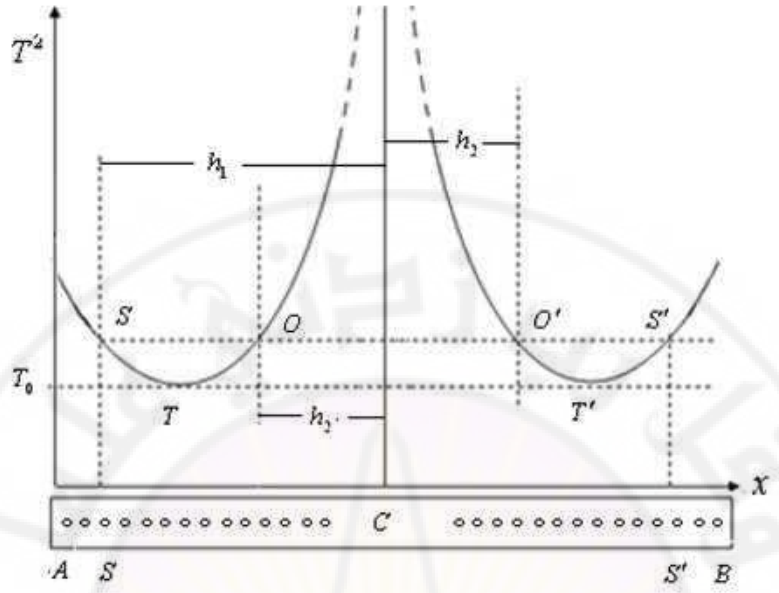
$$h=\overline{CS}=\overline{CA}+\overline{AS}=-d+x \qquad (26)$$

حيث: x فاصلة محور التعليق، وتصبح العلاقة (24) بالشكل التالي:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{K_C^2+(x-d)^2}{g(x-d)}} \qquad (27)$$

ويمثل الشكل4 الخط البياني بين T^2 و x. يُلْحَظُ أنه مكون من جزأين متناظرين بالنسبة إلى مركز الثقل، يماثل كل منهما الشكل3.

إن دراسة هذا الخط البياني ما هي إلّا دراسة لخصائص النواس المركب. فإذا قطعنا المنحني بمستقيم يوازي محور الفواصل، فإنه في الحالة العامة يقطع المنحني في أربع نقاط S و O و O' و S' تمثل أربعة أوضاع للنواس لو علق في أي منها لكان دور النوسان واحداً فيها جميعاً، إلاّ أن كل زوج منها O و O' من جهة و S و S' من جهة أخرى متناظر بالنسبة لمركز الثقل C، لذلك فإن هذه النقاط الأربع إنما تحدد وضعين فقط



الشكل4

مختلفين بالنسبة إلى مركز الثقل، ولتكن القيمة العددية لبعد كل من هذين الوضعين S و O' عن مركز الثقل h_1 و h_2 على الترتيب. تسمى O' في هذه الحالة: مركز الاهتزاز بالنسبة إلى المحور المار في S، ويعني هذا أننا لو علقنا النواس في الوضع S، ثم في الوضع O' (أو O) فإن دور الاهتزاز يبقى نفسه، وهذا الأمر هو من الخصائص المميزة للنواس المركب.

ونرى من العلاقة (24) أنه يجب أن يكون في هذا الحالة:

$$\frac{K_C^2+h_1^2}{h_1}=\frac{K_C^2+h_2^2}{h_2} \longrightarrow$$

$$K_C^2=h_1h_2 \qquad (28)$$

عندما نقارن العلاقة (24) بعلاقة دور النواس البسيط ذي الطول l، أي $T=2\pi\sqrt{l/g}$ نجد أن طول النواس البسيط l المكافئ للنواس المركب في الوضعين S و O' يساوي:

$$l=\frac{K_C^2+h_1^2}{h_1}=\frac{K_C^2+h_2^2}{h_2}$$

وبتعويض K_C^2 بقيمتها من (28) نجد:

$$l=\frac{h_1h_2+h_1^2}{h_1}=h_1+h_2 \qquad (29)$$

أي إن الدور في هذين الوضعين يعطى بالعلاقة:

$$T=2\pi\sqrt{l/g}=2\pi\sqrt{\frac{h_1+h_2}{g}} \qquad (30)$$

يدل المماس لمنحني الشكل4 عند نهايته الصغرى على أن هناك موقعاً P (أو P') إذا

علق النواس منه يكون لدوره قيمة صغرى، وينطبق عنده الموقعان S و O في P كما ينطبق الموقعان O' و S' في P' أي يصبح $h_C = h_1 = h_2$.

وبتعويض هذه النتيجة في العلاقة (28) نجد:

$$K_C = h_C \qquad (31)$$

أي إن نصف قطر العطالة K_C يساوي بعد محور التعليق عن مركز ثقل النواس عندما يكون الدور في نهايته الصغرى T_0.

3. الأدوات والأجهزة

قضيب معدني على شكل متوازي مستطيلات فيه ثقوب، الأبعاد فيما بينها متساوية تقريباً، وفي مركزه كتلتان. تقدّر كتلته بنحو $1.300kg$، كما تقدّر قيمة كل من الكتلتين في مركزه بنحو $2.273kg$ ومجموعهما $4.546kg$، محور التعليق وهو موشور ثلاثي حاد الحروف يستند القضيب من أحد ثقوبه إلى أحد حروفه الأفقية، حامل تثبيت، عداد للثواني، ومقياس للطول.

4. طريقة العمل

قس بوساطة عداد الثواني الزمن اللازم لخمسين نوسة كاملة في كل وضع من أوضاع التعليق، وخذ معدل الدور الكامل في كل تجربة (لماذا لا نكتفي بقياس زمن عشر نوسات فقط؟). تؤخذ أوضاع التعليق على جانبي الكتلة المركزية، وتقاس بدءاً من أحد طرفي القضيب (لاحظ القضيب أسفل الشكل4). رتب نتائج قياساتك في الجدول أدناه الذي يضم كلاً من بعد محور التعليق عن نقطة ثابتة، وزمن خمسين نوسة وزمن النوسة الواحدة ومربع زمن النوسة الواحدة.

5. تحليل النتائج والمناقشة

1. ارسم الخط البياني لتغير مربع زمن النوسة الكاملة بتغير بعد محور التعليق عن أحد طرفي النواس (A مثلاً)، وتحقق من أن هذا الخط البياني مماثل للخط المرسوم في الشكل4، حيث تمثل الخطوط المتقطعة امتداد الخط البياني خارج نطاق الأوضاع التجريبية.

2. ابحث عن محور التناظر الفعلي بين الجزأين، وحدد بعده عن النقطة A. هل يتفق مع مواقع الثقوب؟ ناقش الجواب.

3. فتش تجريبياً، بعد رسم الخط البياني أو قبل ذلك عن وضعين S و O لو ناس حولهما النواس لكان دوره واحداً في كليهما. ارسم مستقيماً $SOO'S'$ موازياً لمحور الفواصل، وحدد من نقاط تقاطعه مع المنحني طول النواس البسيط المكافئ l.

4. احسب g من العلاقة (30)، واحسب أيضاً الارتياب المطلق Δg.

5. فتش عن النهاية الصغرى لدور النواس المركب T_0 في كل من شطري الرسم، واحسب منها نصف قطر عطالة النواس حول مركز ثقله من وسطي القيمتين ثم عزم عطالة النواس حول مركز ثقله، ثم عين مقدار الارتياب المطلق المرتكب في هذا الحساب.

جدول تسجيل النتائج

رقم الثقب	بعد محور التعليق عن مبدأ القياس d	زمن خمسين نوسة t	زمن النوسة الواحدة T	مربع زمن النوسة الواحدة T^2
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
مركز القضيب				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				
28				

التجربة (1b)

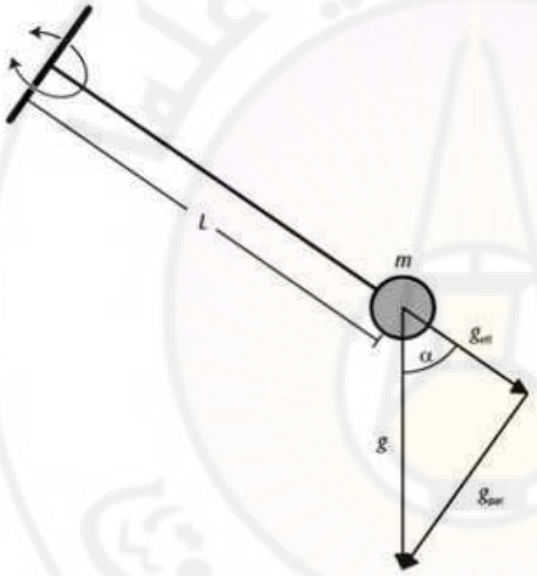
النواس متغير الميل

1. الهدف من التجربة

1. دراسة تغير دور النواس المركب أو النواس البسيط مع تغير تسارع الجاذبية الأرضية.
2. دراسة تغير مسقط تسارع الجاذبية الأرضية بتغير زاوية ميل النواس.
3. إيجاد زاوية الميل الموافقة للنواس المواقت للنواس نفسه على سطح القمر.

2. المبدأ النظري للتجربة

يعرف النواس المتغير بأنه النواس المركب أو البسيط الذي يمكن تغيير دوره بتغيير مسقط تسارع الجاذبية الأرضية، ويتم ذلك بإمالة النواس بزاوية معينة في المستوي العمودي على مستوى الاهتزاز كما هو واضح في الشكل1.



الشكل1. النواس المتغير الميل

وبتطبيق نظرية انحفاظ الطاقة (راجع تجربة النواس المركب المتناظر أو تجربة النواس المركب العكوس) على النواس نجد بأن التواتر الزاوي لاهتزاز النواس المتغير في حالة السعات الزاوية الصغيرة للاهتزاز يعطى بالشكل:

$$\omega_0 = \sqrt{g_{eff} / C} \qquad (1)$$

حيث C ثابت يتعلق بشكل النواس وعطالته. أما g_{eff} فهي المركبة الفعالة لتسارع الجاذبية وتعطى كما هو واضح من الشكل1 بالعلاقة:

$$g_{eff} = g\cos\alpha \qquad (2)$$

حيث α هي زاوية ميل النواس، أما g فهو تسارع الجاذبية الأرضية.

ويمكن الحصول على دور اهتزاز النواس من العلاقة التي تربط بين دور اهتزاز النواس وتواتر اهتزازه الزاوي:

$$\omega_0 = 2\pi / T_0 \qquad (3)$$



الشكل2. النواس المتغير الميل

وبالتالي فإن دور اهتزاز النواس في حالة السعات الزاوية الصغيرة للاهتزاز يعطى بالشكل:

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{C}{g_{eff}}} = 2\pi\sqrt{\frac{C}{g\cos\alpha}} \quad (4)$$

يمكن الاستفادة من النواس المتغير الميل في الحصول على قيمة فعالة لتسارع الجاذبية مساوية لقيمة تسارع الجاذبية على سطح القمر التي تساوي سدس قيمة تسارع الجاذبية الأرضية وبالتالي قياس دور النواس كما لو كان على سطح القمر. ويتم ذلك بإمالة النواس بزاوية ميل معينة تؤدي إلى الحصول على قيمة فعالة لتسارع الجاذبية مساوية لسدس قيمة تسارع الجاذبية الأرضية ويمكن بالاستفادة من العلاقة (2) تحديد تلك الزاوية.

ملاحظة مهمة: يمكن الحصول على دور النواس في الحالة العامة من العلاقة:

$$T \approx T_0\left[1+\left(\frac{\theta_{Max}}{4}\right)^2\right] = 2\pi\sqrt{\frac{C}{g_{eff}}}\left[1+\left(\frac{\theta_{Max}}{4}\right)^2\right] \quad (5)$$

3. الأجهزة والأدوات المستخدمة في التجربة

النواس المتغير وهو عبارة عن قضيب معدني طوله L معلق في نهايته العلوية مؤشر مع مقياس زوايا وفي نهايته السفلية كتلة اسطوانية m كما هو موضح في الشكل2، بوابة ضوئية، عداد رقمي، قضيب حامل مع قاعدة، مؤقت زمني.

4. مراحل العمل في التجربة

1. قياس دور النواس كتابع لزاوية الميل.

قم بإمالة النواس بزوايا ميل $0^0, 5^\circ, 10^\circ, \ldots\ldots, 70^\circ$ وقم بجعله يهتز بإزاحات زاوية صغيرة ثم قم بقياس الدور الموافق من أجل كل زاوية ميل وذلك اعتماداً على البوابة الضوئية والعداد الرقمي أو باستعمال ميقاتية زمنية وذلك بقياس مدة عشر نوسات ورتب نتائجك في الجدول.

α°	0^0	5^0	10^0	15^0	20^0	25^0	30^0	35^0
$T_0(s)$								
$\cos\alpha$								
$g_{eff}(ms^{-2})$								
α°	40^0	45^0	50^0	55^0	60^0	65^0	70^0	
$T_0(s)$								
$\cos\alpha$								
$g_{eff}(ms^{-2})$								

احسب قيم جيب تمام زاوية الميل والقيم الفعالة لتسارع الجاذبية وضعها في مكانها المناسب في الجدول السابق.

2. دور النواس على سطح القمر

قم بحساب قيمة زاوية ميل النواس التي تجعل القيمة الفعالة لتسارع الجاذبية تساوي قيمة تسارع الجاذبية على سطح القمر وذلك اعتماداً على العلاقة (2) وقم بإمالة النواس وفقاً لتلك الزاوية واجعله يهتز بسعات زاوية صغيرة وقس دور النواس عند تلك الزاوية.

5. تحليل النتائج التجريبية

1. ارسم تغيرات دور النواس المتغير بدلالة زاوية الميل على ورقة ميلمترية. هل يزداد الدور أم ينقص بزيادة زاوية ميل النواس؟

2. ارسم تغيرات دور النواس بدلالة جيب تمام زاوية الميل على ورقة لغارتمية واستنتج قيمة ميل المنحني البياني الناتج واحسب الارتياب المطلق في تحديد قيمة ميل المنحني.

3. احسب قيمة الثابت C عند زاوية ميل النواس $\alpha = 0^\circ$ وذلك بالاستفادة من العلاقة (1) واحسب الارتياب المرتكب في تحديد تلك القيمة.

4. احسب قيمة الثابت C عند زاوية ميل النواس الموافقة للقيمة الفعالة لتسارع الجاذبية المساوية لقيمة تسارع الجاذبية على سطح القمر واحسب الارتياب المرتكب في تحديدها.

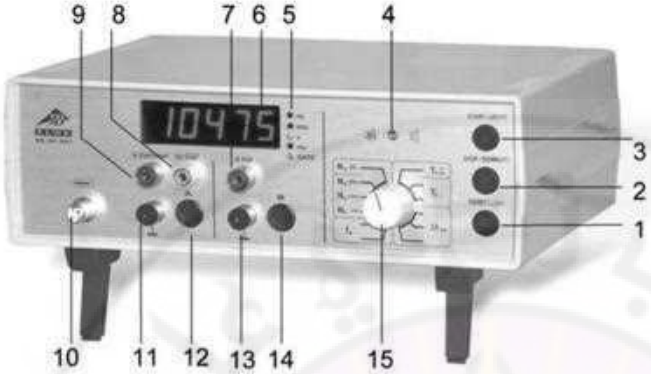
5. ماذا تلاحظ من النتيجتين السابقتين.

طلبات إضافية:

احسب قيمة الثابت C من رسم تغيرات دور النواس بدلالة جيب تمام زاوية ميل النواس على الورقة اللغارتمية.

ملحق أول:العداد الرقمي

يمكن باستخدام العداد الرقمي اجراء قياسات عديدة كقياس الزمن والدور والتواتر وقياس عدد الدورات أو الاهتزازات بالإضافة إلى قياس معدل العد باستخدام أنبوب غايغر أو كاشف ضوئي.



الشكل3. العداد الرقمي

يوضح الشكل3 مفاتيح وأزرار العداد الرقمي:

1- مفتاح إعادة الضبط (Reset).
2- مفتاح الإيقاف اليدوي (Stop).
3- مفتاح البدء (Start).
4- قاطعة لإظهار صوت إشارة العد.
5- مجموعة من الثنائيات المصدرة للضوء للدلالة على المقدار المقيس في العداد الرقمي.
6- شاشة عرض النتائج.
7- قابس إشارة الإيقاف.
8- قابس نهاية إشارة بدء القياس.
9- قابس إشارة بدء القياس.
10- قابس BNC بجهد مرتفع.
11- قابس أرضي لإشارة بدء القياس.
12- مدخل للبوابة الضوئية.
13- قابس أرضي لإشارة الإيقاف.
14- مدخل للبوابة الضوئية.
15- قاطعة دوارة لاختيار المقدار المقيس.

ملحق ثان:البوابة الضوئية

تتكون البوابة الضوئية من حاجز على شكل حرف U مع حامل، ويوجد عند نهاية إحدى الشعبتين ثنائي مصدر للضوء وكاشف ضوئي مقابله. يغذى الثنائي وتسير إشارة الكاشف عبر كبل متعدد الإبر. تعمل البوابة الضوئية (الشكل4) بشكل مماثل للحاجز الضوئي ذي الشعبتين (راجع تجربة عزوم العطالة 2) وتستخدم لقياس الدور أو الزمن أو التواتر إلّا أنها تحتاج لحاسب أو عداد رقمي لإظهار نتيجة القياس خلافاً للحاجز الضوئي ذي الشعبتين الذي يظهر نتيجة القياس مباشرة عن طريق شاشة الإظهار المدمجة معه.



الشكل4. البوابة الضوئية والكابل

التجربة (2)

قياس عزوم العطالة لأجسام مختلفة

(باستخدام كاشف الحركة والحاسب)

1. هدف التجربة

قياس عزوم العطالة لأجسام مختلفة نذكر منها: القرص والأسطوانة المصمتة والأسطوانة الجوفاء، وكرةً، وقضيباً بكتل متحركة ثم التحقق من قانون هويغنز *Huygens' Law*.

2. المبدأ النظري

يعرّف عزم عطالة جسم بالنسبة إلى نقطة بأنه مجموع حاصل ضرب كتلة كل جسيم (من الجسيمات المكوّنة للجسم) في مربع بعده عن تلك النقطة أي $I = \Sigma m_i r_i^2$. وبالمثل يعرّف عزم عطالة جسم بالنسبة إلى محور بأنه مجموع حاصل ضرب كتلة كل جسيم في مربع بعده عن المحور. إن حساب عزم عطالة الجسم بالنسبة لمركز كتلته يبسط الحساب؛ لأنه يمكن أخذ عناصر تناظر الجسم في الحسبان بسهولة. وإذا كانت النقطة المطلوب حساب عزم العطالة بالنسبة لها غير المركز فهناك قوانين بسيطة لحسابها. وكذلك الأمر بالنسبة لعزم عطالة جسم بالنسبة لمحور (قانون هويغنز مثلاً). لذلك يجزأ الجسم عادة إلى أجزاء لا متناهية في الصغر يحسب حجمها، و يضرب بكثافة الجسم، ثم يكامل على كامل حدود الجسم الهندسية. عند حساب عزم عطالة قرص مثلاً، سمكه h، حول محور عمودي عليه، ويمر من مركزه الذي هو مركز كتلته، نأخذ عليه حلقة عنصرية عرضها dr ومحيطها $2\pi r$ فتكون كتلتها $dm = 2\pi r\, dr\, h\, \rho$، ويكون لجميع عناصر هذه الحلقة البعد نفسه عن محور الدوران، ومِنْ ثَمَّ نحصل بمكاملة هذه الحلقة على كامل القرص على:

$$I = \frac{1}{2} mR^2$$

أي إن عزم عطالة قرص بالنسبة إلى محور يمر في مركزه عمودياً على سطحه تابع لكل من كتلة القرص ونصف قطره.

أسطوانة مصمتة وأخرى جوفاء

– حالة الأسطوانة المصمتة I_s، وينطبق عليها قانون عزم عطالة القرص بالنسبة إلى محوره:

$$I_s = \frac{1}{2} m_s R^2$$

m_S كتلة الأسطوانة المصمتة و R نصف قطرها.

- إن عزم عطالة أسطوانة جوفاء تابع لمجموع مربعي نصفي قطريها الخارجي والداخلي.

يمكن حساب عزم عطالة الأسطوانة الجوفاء من الفارق بين عزمي عطالة أسطوانتين مصمتتين متساويتين في الكثافة وأبعادهما تقابل على الترتيب الأبعاد الخارجية والداخلية للأسطوانة الجوفاء.

$$I_H = \frac{1}{2} m_e R_e^2 - \frac{1}{2} m_i R_i^2$$

حيث $I_e = \frac{1}{2} m_e R_e^2$ عزم عطالة الأسطوانة الخارجية (R_e نصف قطرها الخارجي) و $I_i = \frac{1}{2} m_i R_i^2$ عزم عطالة الأسطوانة الداخلية (R_i نصف قطرها الداخلي). ولكن كتلة الأسطوانة الخارجية $m_e = \rho h \pi R_e^2$ وكتلة الأسطوانة الداخلية $m_i = \rho h \pi R_i^2$، وبالتعويض في علاقة عزم عطالة الأسطوانة الجوفاء نحصل على:

$$I_H = \frac{1}{2} \rho.h.\pi R_e^4 - \frac{1}{2} \rho.h.\pi R_i^4$$

أو $I_H = \frac{1}{2} \rho h \pi \left(R_e^2 - R_i^2\right)\left(R_e^2 + R_i^2\right)$

ولكن $\rho h \pi \left(R_e^2 - R_i^2\right)$ يساوي كتلة الأسطوانة الجوفاء m_H، ومِنْ ثَمَّ فإن عزم عطالة الأسطوانة الجوفاء يساوي:

$$I_H = \frac{1}{2} m_H \left(R_e^2 + R_i^2\right)$$

- يمكن بالمثل استنتاج عزم عطالة كرة بالنسبة إلى مركزها بأخذ قشرة كروية كتلتها $dm = \rho 4\pi r^2 dr$، فيكون عزم عطالتها العنصري بالنسبة للمركز $dI = dm r^2$، وبإجراء التكامل على r من مركز الكرة إلى R، $I_O = \int_0^R \rho 4\pi r^4 dr = \rho 4\pi R^5 / 5$، حيث R نصف قطر الكرة. ومِنْ ثَمَّ $I_O = \frac{3}{5} MR^2$، حيث كتلة الكرة $M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$. أما عزوم عطالة الكرة بالنسبة لمحاورها الإحداثية الثلاثة فهي متساوية بسبب التناظر، ومِنْ ثَمَّ يكون عزم عطالة الكرة بالنسبة لأحد محاورها وليكن x مساوياً $I_x = \frac{2}{3} I_O = \frac{2}{5} MR^2$. يُلْحظ بأن عزم عطالة كرة بالنسبة إلى محور يمر من مركزها تابع لكل من كتلتها ونصف قطرها، وبأنه أصغر من عزم عطالة جسم أسطواني له نصف القطر نفسه وكتلة الكرة نفسها.

- إن عزم عطالة قضيب يحمل كتلاً يمكن تحريكها يعتمد على موقع الكتل عليه.

- إن عزم عطالة جسم بالنسبة إلى محور لا يمر من مركز ثقله يساوي مجموع عزمي

العطالة التاليين:

1.عزم عطالة الجسم بالنسبة إلى ذلك المحور باعتبار أن كتلة الجسم كلها تتركز في مركزه، تكون مساوية ml^2، حيث l البعد بين المحورين.

2. عزم عطالة الجسم بالنسبة إلى محور دوران يمر من مركز ثقله I_C:

$$I = I_C + ml^2$$

وهذا ما يعرف بقانون هويغنز (أو شتاينر في بعض المراجع).

تقاس عزوم العطالة المختلفة لهذه الأجسام بتركيبها على حامل في جهاز للاهتزاز فيه نابض حلزوني يزود جهاز الاهتزاز بعزم إرجاع M يتناسب طردياً مع الزاوية θ التي تبعده عن وضع توازنه أي: $M = -D\theta$، الأمر الذي يؤدي إلى اهتزاز هذه الأجسام. وبتطبيق نظرية الاندفاع الزاوي (انظر التمهيد النظري لنظرية النواس المركب المتناظر)، نجد أن تواتر الحركة يعطى بالعلاقة:

$$\omega = \sqrt{D/I}\,.$$

3. الأجهزة والأدوات



الشكل1. مقياس عزوم العطالة يتضمن جهاز الاهتزاز الزاوي ذا نابض الفتل الحلزوني والحاجز الضوئي والوحدة الأساسية Cobra3

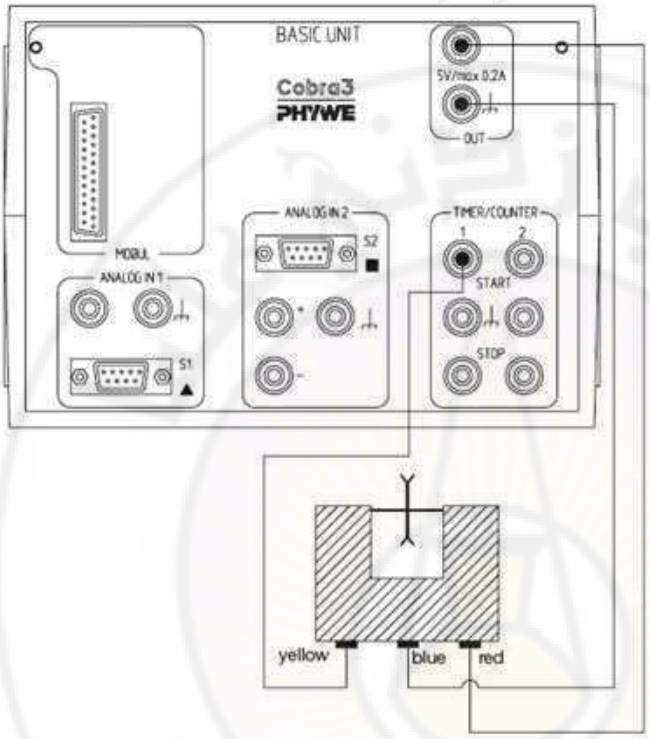
1. الوحدة الأساسية Cobra3 (راجع الملحق1)، 2. منبع تغذية 12V، 3. كابل نقل معطيات RS232، 4. برنامج Measure للحركة الانسحابية – الدورانية، 5. حاجز ضوئي (راجع الملحق2)، 6. جهاز الاهتزاز الزاوي، 7. ميزان، 8. بطارية 9V أو منبع تغذية، 9. خيط حرير

بطول 200m، 10. حامل أثقال كتلته 1g، 11. ثقل مشقوق كتلته 1g، 12. ماسك تثبيت بالمنضدة، 13. قاعدة ثلاثية الأرجل، 14. أنبوب تثبيت الأجسام، 15. مقياس أطوال بطول مترين، 16. سلك توصيل أحمر بطول 100cm، 17. سلك توصيل أزرق بطول100cm، 18. سلك توصيل أصفر بطول 100cm، 19. حاسب بويندوز 95 فما فوق. كتلة القرص المصمت دون ثقوب (292g)، والأسطوانة الجوفاء (352g)، والأسطوانة المصمتة (365g)، الكرة (613g)، وكتلة القرص ذي الثقوب الذي تقع جميع ثقوبه على نصف القطر 403g دون الكتلة المركزية و 455g بوجود الكتلة المركزية، كتلة الأسطوانة المتحركة التي تركب على القضيب تساوي 211g.

4. مراحل العمل

- يتم إعداد أدوات التجربة وتوصيل الدارة وفقاً للشكلين 1 و 2.
- تأكد من اتصال الحاسب بوحدة القياس Cobra3 التي تتصل بالحاجز الضوئي الذي تتم من خلاله مراقبة الحركة الاهتزازية لمختلف الأجسام التي تركب على جهاز الاهتزاز الزاوي.
- تأكد أيضاً من التوصيل الكهربائي للحاجز الضوئي بالوحدة الأساسية Cobra3 وفق الشكل2، وأن الخيط الذي يصل محور الدوران بعجلة الحاجز الضوئي أفقي، وأنه قد تم لفه نحو سبع مرات حول محور الدوران في جهاز الاهتزاز الزاوي وذلك أسفل برغي التثبيت، مع مراعاة أن اتجاه اللّف يكون بحيث يلتف الخيط على محور الدوران لدى انضغاط الحلزون ويتحرر مع تخلخل الحلزون.
- مرر خيط الحرير الذي يصل بين محور دوران جهاز الاهتزاز الزاوي والحاجز الضوئي على عجلة الحاجز الضوئي بحيث يتدلى حامل الأثقال ذو الكتلة 1g بحرية بحيث تقع العجلة في منتصف خيط الحرير تقريباً. وفي كل الأحوال يجب أن يكون الخيط طويلاً إلى حد كاف بحيث لا يعيق الاهتزاز، كما يجب أن يكون مشدوداً في أثناء حركته على الحاجز الضوئي، فإذا لم يكن كذلك فيجب تحميله بكتل إضافية كتلة كل منها 1g.
- شغّل الحاسب، ثم انقر على أيقونة برنامج القياس Measure على شاشة الحاسب الذي ستعتمد عليه في قياس أدوار اهتزاز مختلف الأجسام التي يطلب قياس عزوم عطالتها. فيظهر على الشاشة مربع الحوار الذي يظهر على الشكل3. اجعل وسطاء القياس موافقة للشكل3.

أدخل المقدار 20*mm* عند Axle dia (قطر محور الدوران)، وذلك لجعل دورات عجلة الحاجز الضوئي تتزامن مع دورات جهاز الاهتزاز الزاوي الذي يدور بسرعات مختلفة.



الشكل2. توصيل الحاجز الضوئي بالوحدة الأساسية (وحدة Cobra3).

- قم بتركيب الأجسام التالية بالتتالي على جهاز الاهتزاز الزاوي: القضيب دون الكتلة المركزية (وكتلته 133*g* ويضاف لها الكتلة المركزية 45*g*).

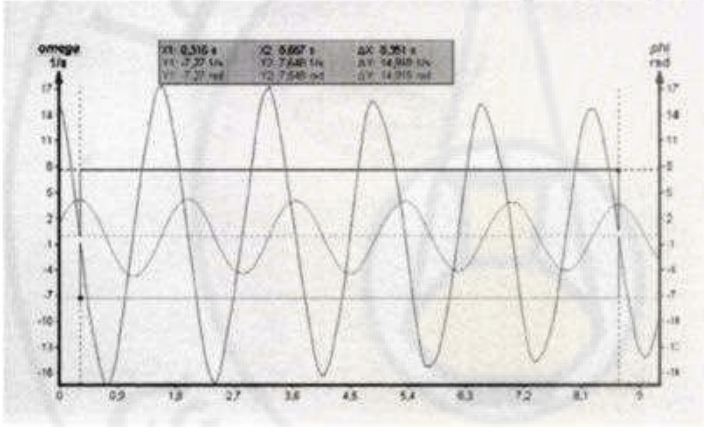
- قم بتدوير الجسم الذي يركب على جهاز الدوران المزود بنابض إرجاع حلزوني بنحو 180^{o}، وابدأ بتسجيل قيم زوايا الدوران والتسارع الزاوي لكل جسم بالضغط على أيقونة بدء القياس: *start –measurement*

بعد نحو عشر إلى خمس عشرة ثانية اضغط على أيقونة وقف القياس Stop measurement. اختر الفاصل الزمني بين قياسين متتاليين بحيث يوافق كتلة الجسم المهتز ودوره، وذلك من خلال مربع الحوار على شاشة الحاسب المبين في الشكل3. إذا كانت قيمة 50 ms في مربع الحوار (Get values every 50ms أي خذ قيماً كل 50ms) عالية جداً أو منخفضة جداً يمكن حدوث قياسات مشوشة أو غير متجانسة، وإذا حدث ذلك قم بتعديل معدل أخذ القياسات.



الشكل3. وسطاء القياس

- (لاحظ أنه كلما كانت كتلة الجسم المهتز أكبر فإنك تضطر لزيادة اتساع الفواصل الزمنية التي تؤخذ عندها القياسات (Get values every 100ms مثلاً) للحصول على صورة واضحة للاهتزاز على شاشة الحاسب. وبالعكس فإنه عندما تكون كتلة الجسم صغيرة فإنك تضطر لتصغير اتساع الفواصل الزمنية التي تؤخذ بموجبها القياسات).



الشكل4. نتيجة قياس نموذجية

- بعد تقويم خصائص الحركة الاهتزازية من خلال برنامج القياس، تظهر على الشاشة صورة تشبه الشكل 4. قم بقياس دور الاهتزاز T بمساعدة قيم الأزمنة التي تظهر عند النقر على القمم بالفارة.

ملاحظة مهمة. إذا كان ثابت الإرجاع الزاوي (عزم الإرجاع الزاوي) D للنابض الحلزوني المستخدم غير معروف، ضع جسماً عزم عطالته I معروف على جهاز الدوران الزاوي (القضيب من دون الكتل المتحركة) وقس حركته بالطريقة المذكورة أعلاه ومِنْ ثَمَّ يمكن حساب D واستخدامه في الحسابات التالية، ولذلك تتبع الطريقة التالية:

- قس دور الاهتزاز الدوراني لجسم عزم عطالته معروف كالقضيب مثلاً، $I_o = \frac{1}{12}ML^2 = \frac{1}{12} \times 0.1715 \times (0.60)^2 kgm^2 = 0.0051 kgm^2$ ، حيث L طول القضيب

ويساوي $L = 60cm$ ، كتلته $M = 0.1715kg$ ، وذلك للحصول على عزم الإرجاع الزاوي D للنابض الحلزوني بتطبيق العلاقة:

$$T = 2\pi\sqrt{I/D} \quad \text{ومِنْ ثَمَّ} \quad D = 4\pi^2 I/T^2$$

– قس أدوار الاهتزاز للأجسام المختلفة (القرص غير المثقب والأسطوانة المصمتة والأسطوانة الجوفاء والكرة).

الجدول 1

الجسم	$M(kg)$	$R(m)$	$T \pm \Delta T$	$(I \pm \Delta I)_{meas} kgm^2$	$(I \pm \Delta I)_{cal} kgm^2$
القرص غير المثقب	0.292	0.11			
الأسطوانة المصمتة	0.370	0.049			
الأسطوانة الجوفاء	0.390	R_e / R_i: 5/4.6			
الكرة	0.798	0.07			

حيث R_e نصف القطر الخارجي للأسطوانة الجوفاء، و R_i نصف قطرها الداخلي.

ملاحظات: – يمكن في حالة السرعات الزاوية الصغيرة للغاية، حدوث إشارات عابرة أو مشوهة. يمكن تخفيض هذه الأخيرة بتغيير معدل أخذ القياسات (على مربع الحوار). يمكن اختيار مجالات مسجلة خالية من الخطأ من إشارة القياس بعد انتهاء القياسات.

– لأن تسجيل الحركة لا يجري دون تماس، يحدث تخامد طفيف للإشارات المقيسة.

– لا يمكن قياس السرعات الزاوية الصغيرة جداً بعجلة الحاجز الضوئي فترسم على أنها الخط المرجعي.

– احسب عزم عطالة كل من الأجسام السابقة بتطبيق كل من ثابت (عزم) إرجاع النابض الحلزوني الذي سبق حسابه ودور الاهتزاز T المقيس الموافق في العلاقة:

$$I = \frac{T^2}{4\pi^2} D$$

أكمل الجدول1 (الذي وردت فيه أبعاد الأجسام المدروسة وكتلها)، بكل من القيم المقيسة I_{meas}

لعزوم عطالتها والقيم المحسوبة I_{cal} بالاعتماد على العلاقات النظرية الواردة في المبدأ النظري للتجربة.

- وازن بين قيم عزوم العطالة المحسوبة وفقاً للعلاقات الواردة في المبدأ النظري للتجربة والقيم التي تم الحصول عليها تجريبياً بعد تقدير الارتيابات، ثم قرر فيما إذا كانت هذه النتائج مرْضِية أم لا.

دراسة تأثير توزع الكتل على عزوم العطالة

- يحمَّل القضيب بكتلة m عند كل من طرفيه وعلى بعد واحد l من مركزه والذي يمكن تغييره، فيكون عزم العطالة الكلي يساوي: $(1/12)ML^2 + 2m.l^2 = I_0 + 2.m.l^2$ لجملة القضيب والكتلتين، وهذا ما نحصل عليه تجريبياً من قياس الدور.

- املأ الجدول2 بكل من القيم المقيسة لعزم عطالة القضيب دون تعليق أي كتلة ثم بتعليق كتلتين إضافيتين في مواقع مختلفة ومتساوية البعد عن مركزه علماً أن قيمة كل من الكتلتين الإضافيتين $m = 0.2115kg$.

الجدول 2

$l\,(cm)$	$(I \pm \Delta I)_{meas} kgm^2$	$2.l^2 m\ (kgm^2)$	$2.l^2 m + I_0\ (kgm^2)$	$(I \pm \Delta I)_{cal} kgm^2$
5				
10				
15				
20				
25				

قانون هويغنز *Huygens' Law*:

للتحقق من هذا القانون ثبتْ القرص المثقب على أبعاد مختلفة بين مركز ثقله ومحور الدوران، ثم املأ الجدول3، ثم تحقق من صحة قانون هويغنز، بعد حساب الارتيابات طبعاً.

الجدول 3

$l(cm)$	$I_{meas}\,(kgm^2)$	$\Delta I_{meas} kgm^2$	$ml^2\,(kgm^2)$	$I_0 + ml^2\,(kgm^2)$	$\Delta I_{cal} kgm^2$
0				0.0050	
3					
6					
9					
12					

الملحق1: الوحدة الأساسية Cobra3 + حاسب

هي نظام شامل لتسجيل وعرض وتحليل كل أنواع معطيات القياس حيث يتم الوصل فيما بين وحدة Cobra3 (الشكل5) والحاسب من خلال بوابة تسلسلية. تحوي وحدة Cobra3 على سطحها الجانبي بوابة قابس من أجل التطبيقات المستقبلية.

يضم الوجه الأمامي للوحدة الأساسية Cobra3 عدة مداخل:

1- مدخل تمثيلي أول مرتبط بالأرضي Analog In 1 إلى يسار الوحدة وإلى الأسفل $\pm(30V, 10V)$، مقبسان $4mm$، والقدح لبدء القياس ممكن.

2- مدخل تمثيلي ثان تفاضلي Analog In 2 في وسط الوحدة وإلى الأسفل $\pm(30V, 10V, 3V, 1V, 0.3V, 0.1V)$، مقبسان $4mm$. والقدح لبدء القياس ممكن.

3- مدخل لبوابة حساس Sensor Port2 يقع على التوازي مع Analog In2 بالإضافة إلى مخرج تمثيلي وTTL، مقبس ثنائي، والقدح لبدء القياس ممكن.

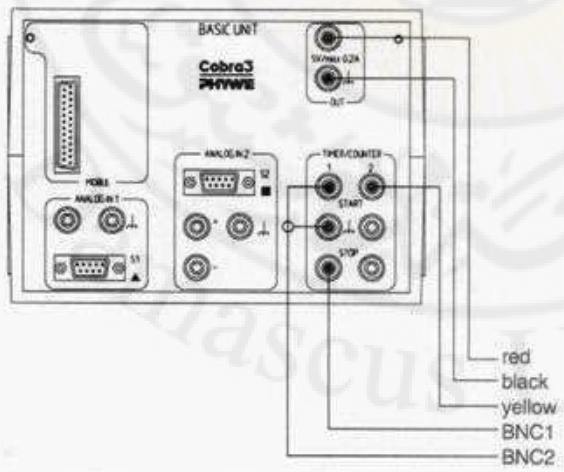
4- معدل المسح $500kHz$ max، المقدرة الفاصلة $12Bit$ ($50\mu V$ max)

5- بوابة وحدة/ بوابة حساس Sensor Port1، وتقع إلى يسار الوحدة في الأعلى $D-SUB-25-jack/diode\ jack$ ثنائي الاتجاه (تمثيلي ورقمي)، القدح لبدء القياس ممكن.

6- **مؤقت/ عداد أول** Timer /Counter1، $32\ Bit$، المقدرة الفاصلة $800ns$، مقبسان $4mm$.

مؤقت/عداد ثان Timer/ Counter2، $40\ Bit$، المقدرة الفاصلة $20ns$، مقبسان $4mm$.

التوصيلات الممكنة: في حالة الإشارات TTL يستخدم المؤقت- عداد/عداد مع البوابة الزمنية، وفي حالة الإشارات التمثيلية يستخدم العداد/عداد مع البوابة الزمنية.

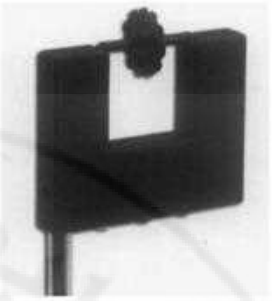


الشكل5

أنماط النقل: يتم النقل فيها باستمرار أو على شكل نبضات.



الوحدة الأساسية Cobra3



الحاجز الضوئي ذو العجلة المسننة

الشكل6

مخرج للكمون: $5V/0.2A$ (في حالة الحواجز الضوئية مثلاً) مقبسان $4mm$.

البوابات RS232C-D-SUB-25-jacks حتى 115200baud في حالة الحاسب.

علبة التغذية: $9...18V$، مقبس للكمون المنخفض في حالة وحدة التغذية.

الملحق 2: الحاجز الضوئي ذو العجلة المسننة 11207.20 (انظر الشكل 6)

يتألف الحاجز الضوئي من عجلة مسننة ومن منبع ضوئي (ثنائي ضوئي) في إحدى شعبتيه، يصدر حزمة ضوئية يتم استقبالها بخلية كهرضوئية تقع في الجهة المقابلة من الشعبة الأخرى. عندما يعترض أحد أسنان العجلة في أثناء حركتها الحزمة الضوئية ينقطع الضوء عن الخلية، ومِنْ ثَمَّ يمكن قياس المسارات من خلال إحصاء عدد الإعتامات التي تمر بها الخلية.

التجربة (3)

النواس المركب العكوس

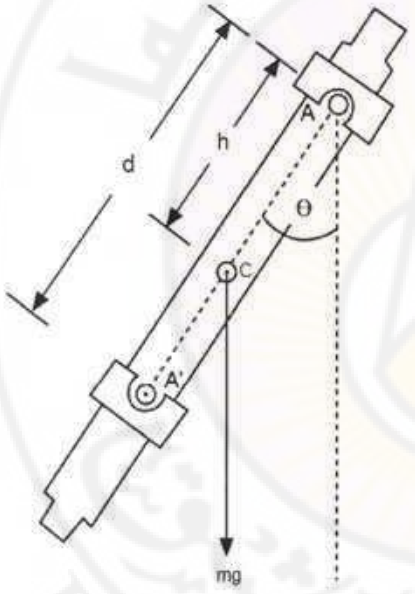
1. هدف التجربة

دراسة النواس المركب وعلاقته بمركز كتلته وعزم عطالته، والتعرف على النواس المركب العكوس ومميزاته الناتجة عن إمكانية تغيير مركز ثقله وعزم عطالته، ثم استعماله في تعيين تسارع الجاذبية الأرضية بدقة.

2. المبدأ النظري

النواس المركب عبارة عن كتلة مادية تهتز حول محور مار منها بحيث تتوزع هذه الكتلة على كامل الفراغ حول محور التعليق وهذا ما يميزه من النواس البسيط.

يبين الشكل1 نواساً مركباً يهتز حول محور يمر من النقطة A عمودياً على مستوي الورقة. ولدراسة حركة النواس المركب ننطلق من قانون انحفاظ الطاقة بحيث يكون مجموع الطاقة الكامنة والطاقة الحركية للنواس المركب مساوياً إلى مقدار ثابت.



الشكل1. النواس المركب العكوس

الطاقة الكامنة للنواس المركب هي الطاقة الكامنة الثقالية التي تساوي (الشكل1):

$$E_p = -mgh\cos\theta \qquad (1)$$

حيث: m كتلة النواس المركب، θ إزاحته الزاوية عن الشاقول، h بعد مركز ثقله C عن محور التعليق. أما طاقته الحركية فتساوي مجموع الطاقات الحركية لجسيماته عندما يهتز حول محور الدوران:

$$E_k = \tfrac{1}{2}\sum_i m_i v_i^2 \qquad (2)$$

وحسب العلاقة بين السرعة الزاوية للجسيم $\dot{\theta}_i$ وشعاع موضعه r_i بالنسبة لمحور التعليق وسرعته الخطية نكتب:

$$E_k = \tfrac{1}{2}\sum_i m_i r_i^2 \dot{\theta}_i^2 \qquad (3)$$

وبما أن السرعة الزاوية ثابتة لكل الجسيمات المكونة للنواس المركب فيمكن أن نكتب:

$$E_k = \frac{\dot{\theta}^2}{2}\sum_i m_i r_i^2 \qquad (4)$$

كما يمكن أن نكتب الطاقة الحركية للنواس المركب على الشكل التالي:

$$E_k = \tfrac{1}{2} I\dot{\theta}^2 \qquad (5)$$

حيث I، عزم عطالة النواس المركب بالنسبة لمحور التعليق، $\dot{\theta}$ سرعته الزاوية. ومِنْ ثَمَّ يمكن أن نكتب طاقته الكلية على النحو:

$$E = E_k + E_p = Const \qquad (6)$$

$$E = \tfrac{1}{2} I\dot{\theta}^2 - mgh\cos\theta \qquad (7)$$

وبإعادة ترتيب العلاقة السابقة نحصل على العلاقة:

$$\dot{\theta}^2 - \frac{2mgh}{I}\cos\theta = C_1$$

التي تمثل معادلة الحركة العامة للنواس المركب وهي معادلة تفاضلية غير خطية من المرتبة الأولى ومن الدرجة الثانية.

يمكن في حالة الإزاحة الزاوية الصغيرة أن نعبِّر عن منشور تجب زاوية الإزاحة على النحو:

$$\cos\theta \approx 1-(\theta^2/2) \qquad (8)$$

وبالتعويض في العلاقة العامة لحركة النواس المركب نحصل على معادلة الحركة حالة السعات الزاوية الصغيرة والتي تعطى بالعلاقة التالية:

$$\dot{\theta}^2 + \frac{mgh}{I}\theta^2 = C_2 \qquad (9)$$

وهي معادلة تفاضلية خطية من المرتبة الأولى والدرجة الثانية يتضمن حلها العام ثابتين اختياريين، هما الصفحة الابتدائية φ، والمطال الزاوي θ_0 للحركة:

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega t + \varphi) \qquad (10)$$

حيث $\omega = \sqrt{mgh/I}$ التواتر الزاوي للحركة الاهتزازية للنواس، و $\theta(t)$ زاوية الحركة بدلالة للزمن. تدل العلاقة (10) على أن حركة النواس المركب في حالة السعات الصغيرة هي حركة توافقية تتغير فيها زاوية الحركة مع الزمن بشكل توافقي.

من علاقة التواتر الزاوي للنواس المركب نجد أن دوره في حالة السعات الصغيرة يعطى بالعلاقة:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgh}} \qquad (11)$$

يجدر بنا هنا أن نعرّف نصف قطر عطالة النواس المركب K بالنسبة إلى محور التعليق الذي يبعد المسافة h عن محور مركز الثقل:

$$I = mK^2 = m(K_C^2 + h^2) \qquad (12)$$

أي إن نصف قطر العطالة يعبر عن عزم عطالة النواس المركب فيما لو كانت كتلته مركزة في نقطة تبعد عن محور تعليقه بمقدار نصف

قطر العطالة، و K_C نصف قطر العطالة بالنسبة لمركز الثقل.

نظرية هويغنز في عزوم العطالة

تفيد نظرية هويغنز في حساب عزم عطالة جسم حول محور لا يمر من مركز ثقله في حال معرفة عزم عطالة هذا الجسم حول محور مار من مركز ثقله وتنص هذه النظرية على أن: (عزم عطالة جسم حول محور لا يمر من مركز ثقله، يساوي إلى عزم عطالة هذا الجسم بالنسبة إلى محور مار من مركز ثقله مضافاً إليه جداء كل من كتلة هذا الجسم ومربع بعد هذا المحور عن مركز ثقل الجسم).

وتعطى نظرية هويغنز على الشكل التالي:

$$I = I_C + mr^2 \qquad (13)$$

حيث I، عزم العطالة حول محور لا يمر من مركز ثقل الجسم، I_C عزم العطالة حول محور مار من مركز ثقل الجسم.

وبتطبيق نظرية هويغنز على النواس المركب نجد بأن عزم عطالة النواس المركب بالنسبة لمحور يمر من نقطة تبعد عن مركز ثقل النواس المركب المسافة h يعطى بالعلاقة التالية:

$$I = I_C + mh^2 \qquad (14)$$

وفي هذه الحالة يعطى دور النواس المركب في حالة السعات الصغيرة بالعلاقة:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_C + mh^2}{mgh}} \qquad (15)$$

الطول المختزل للنواس المركب

نعرف الطول المختزل للنواس المركب بالعلاقة التالية:

$$d = \frac{I_C}{mh} + h = \frac{I}{mh} \qquad (16)$$

d الطول المختزل للنواس المركب الذي كتلته m في حالة اهتزازه حول محور يبعد المسافة h عن مركز ثقله، ويلاحظ أن هذا الطول يقابل طول نواس بسيط له الدور نفسه. ومِنْ ثَمَّ يصبح دور النواس في حالة استخدام تعريف الطول المختزل على الشكل التالي:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{d}{g}} \qquad (17)$$

وكما نلحظ فإن هذه العلاقة تشبه علاقة دور نواس بسيط في حالة السعات الصغيرة وهذا ما يعطي للطول المختزل معنىً واضحاً وصريحاً.

من الواضح أن الطول المختزل للنواس المركب يكون دائماً أكبر من البعد بين محور التعليق ومركز ثقله وهذا واضح في الشكل1 ومن ثم تزداد سرعة النواس عندما تتركز كتلته بالقرب من مركز ثقله، لأن الزمن الذي يستغرقه النواس في الاهتزازة يصبح أقصر في هذه الحالة.

وكما نلاحظ تؤدي معرفة الطول المختزل للنواس المركب ومعرفة دور اهتزازه حول محور التعليق إلى تحديد تسارع الجاذبية الأرضية.

ونجد من العلاقة (17) أن التواتر الزاوي للاهتزاز (أو دور الاهتزاز) مستقل ظاهرياً عن البعد بين محور التعليق ومركز ثقل النواس المركب.

النواس المركب العكوس

النواس العكوس عبارة عن نواس مركب يحافظ على قيمة الدور نفسها عندما يهتز حول محور تعليق جديد ينشأ عن محور التعليق السابق بانعكاس نقطة التعليق بالنسبة إلى مركز ثقل هذا النواس. ومن ثم فهو له جميع خواص النواس المركب مثل نصف قطر العطالة والنواس البسيط المكافئ لكنه يختلف عنه بإمكان تغيير مواقع أجزائه وبالتالي مركز كتلته وعزم عطالته بالنسبة لمحور الدوران. ويتكون في التجربة من قضيب مقطعه مستطيل (الشكل2)، يحتوي سكينين يستعملان محوري دوران له، البعد بينهما ثابت وقرصين قابلين للانزلاق على القضيب، أحدهما خارج المحورين والآخر بينهما. يغير موقعا القرصين حتى نحصل على الطول نفسه عندما ينوس النواس حول المحور الأول أو الثاني، ومن هنا جاءت التسمية إذ نحصل على الدور نفسه عند عكس النواس.

فإذا جعلنا النواس المركب المبين في الشكل1 يهتز حول محور مار من النقطة A' التي تبعد المسافة h' عن مركز ثقل النواس المركب C بحيث:

$$h' = d - h \qquad (18)$$

ولدينا من العلاقة (15) دور النواس عندما يهتز حول محور مار من النقطة A.

كما تبين العلاقة (17) دور النواس المركب ولكن بدلالة الطول المختزل للنواس المركب.

وحتى نحصل على دور النواس T' عندما يهتز حول محور مار من النقطة 'A نعوض h' بدلاً عن h في هذه العلاقة (مع ملاحظة أن عزم العطالة حول محور مار من مركز عطالة النواس المركب يبقى نفسه في الحالتين (لماذا؟)) فنحصل على العلاقة التالية:

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{I_C + mh'^2}{mgh'}} \qquad (19)$$

وبتعويض قيمة h' من المعادلة (18) وذلك لكتابة الدور T' بدلالة الطول المختزل للنواس المركب نحصل على:

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{I_C + m(d-h)^2}{mg(d-h)}} \qquad (20)$$

وبالاستفادة من قيمة الطول المختزل المعطى بالعلاقة (16) نجد أن دور اهتزاز النواس العكوس في نقطة التعليق التي تبعد مسافة h' عن مركز ثقله يعطى بالعلاقة التالية:

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{mh^2 + I_C}{mgh}} \qquad (21)$$

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{d}{g}} = T \qquad \text{أو} \qquad (22)$$

ومِنْ ثَمَّ فإن دور اهتزاز النواس المركب العكوس بالنسبة لمحور التعليق الذي يبعد المسافة h عن مركز ثقل هذا النواس يساوي إلى دور اهتزاز النواس المركب العكوس بالنسبة لمحور التعليق الذي يبعد المسافة h' عن مركز الثقل بحيث تحقق هذه المسافة العلاقة (18) وهذا ما يدعو لتسمية هذا النواس المركب بالنواس العكوس.

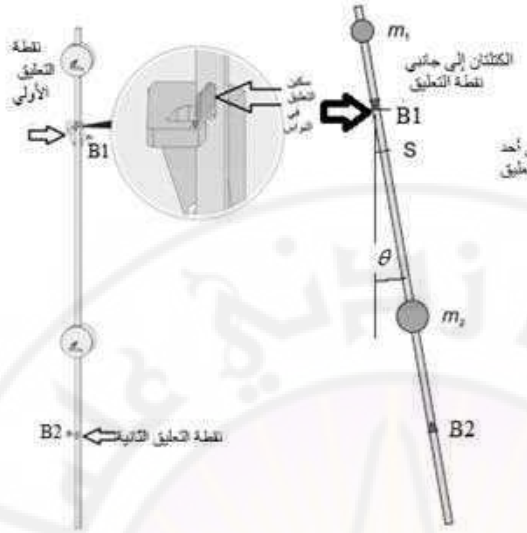
وكما نلاحظ من الشكل1 فإن البعدين h و h' غير متساويين رغم تساوي الدور في كل منهما، ويعود ذلك بالطبع إلى اختلاف عزمي عطالة النواس العكوس في كل منهما.

3. الأجهزة والأدوات

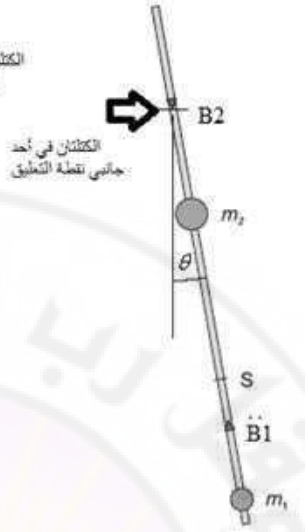
النواس المركب العكوس، ومقياس معدني لقياس الأطوال، ميقاتية لتعيين دور اهتزاز النواس.

النواس المركب العكوس المستخدم في التجربة

النواس المركب العكوس المستخدم في التجربة (الشكلان 2 و3) يتألف من قضيب معدني طوله 1.66m ومن نقطتي تعليق البعد بينهما يساوي 0.994m بحيث يتم تعليق النواس في كلتا الحالتين بواسطة سكين موجودة عند كل نقطة من نقطتي تعليق النواس العكوس، ويحمل هذا القضيب كتلتين مختلفتين بحيث إذا قمنا بتعليق القضيب من نقطة التعليق الأولى B_1 تكون الكتلتان في جانبي محور التعليق الذي يهتز حوله النواس العكوس. أما إذا قمنا بتعليق القضيب من نقطة التعليق الثانية B_2 تكون الكتلتان في أحد جانبي محور التعليق الذي يهتز حوله النواس العكوس. كما أن المسافة بين نقطة التعليق وحافة القضيب تساوي 0.333m وهي نفسها بالنسبة لكل من نقطتي التعليق، ونرمز للمسافة بين الكتلة m_1 ونقطة التعليق بالرمز x_1 وللمسافة بين الكتلة m_2 ونقطة التعليق بالرمز x_2.



الشكل3



الشكل2

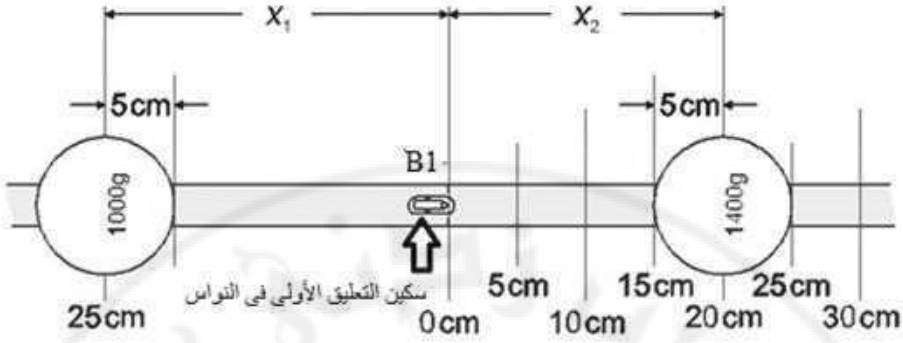
4. مراحل العمل في التجربة

1. ركب النواس العكوس على الماسك المثبت بعمود غير ثابت، وذلك من نقطة التعليق الثانية للنواس بحيث ترتكز سكين التعليق إلى التجويف بأقل احتكاك ممكن.

2. ثبت الكتلة m_1 على البعد $x_1 = 20cm$ عن محور التعليق الأول كما هو موضح في الشكل4 مع ملاحظة أن نصف قطر الكتلة يساوي $5cm$ والبعد المقاس انطلاقاً من بداية سكين محور التعليق حتى مركز الكتلة.

3. ثبت بعد مركز الكتلة m_2 على البعد $x_2 = 15cm$ من بداية محور التعليق الأول، ثم قم بحرف الطرف السفلي للنواس العكوس على التوازي مع عمود التثبيت بحيث تكون السعة العظمى لزاوية الاهتزاز صغيرة (لماذا؟) ثم قم بقياس الزمن الذي يستغرقه النواس حتى يهتز خمسين اهتزازة كاملة (لماذا هذا العدد من الاهتزازات؟). احسب منه دور اهتزاز النواس T_1 وهو زمن اهتزاز النواس مرة واحدة بالنسبة لمحور يمر من نقطة التعليق الثانية.

يبين الشكل4 وضعية كل من الكتلتين m_1 و m_2 بالنسبة إلى محور التعليق الأول للنواس.



الشكل4. وضعية كل من الكتلتين m_1 و m_2 بالنسبة إلى محور التعليق الأول للنواس

4. قم بتعليق النواس من نقطة التعليق الثانية مع الإبقاء على الكتلتين في مكانيهما، ثم قم بقياس زمن اهتزاز النواس خمسين مرة، واحسب منه دور اهتزاز النواس T_2، وهو زمن اهتزاز النواس مرة واحدة بالنسبة لمحور يمر من نقطة التعليق الثانية.

5. كرر المرحلتين الثالثة والرابعة ولكن بتغيير بعد الكتلة m_2 عن بداية محور التعليق الأول، وذلك بدءاً من البعد $x_2 = 15\,cm$ المذكور في المرحلة الثالثة حتى البعد $x_2 = 80\,cm$ وذلك بخطوة مقدارها $5\,cm$ مع إبقاء الكتلة m_1 في مكانها، وقم بتسجيل النتائج في جدول يتضمن بُعْدَ الكتلة m_2 عن المحور المار من نقطة التعليق الثانية، وكلّاً من زمن خمسين اهتزازة ودوري الاهتزاز T_1 و T_2 حول محوري التعليق.

5. تحليل ومناقشة النتائج المأخوذة في التجربة

1. احسب مربعي دوري الاهتزاز T_1 و T_2، وذلك بدلالة البعد x_2، وسجل النتائج في نفس الجدول السابق، ثم ارسم مربعي دوري الاهتزاز T_1^2 و T_2^2، وذلك بدلالة البعد x_2 على نفس ورقة الرسم، ويجب أن يتم الرسم باعتبار مستطيل الارتياب.

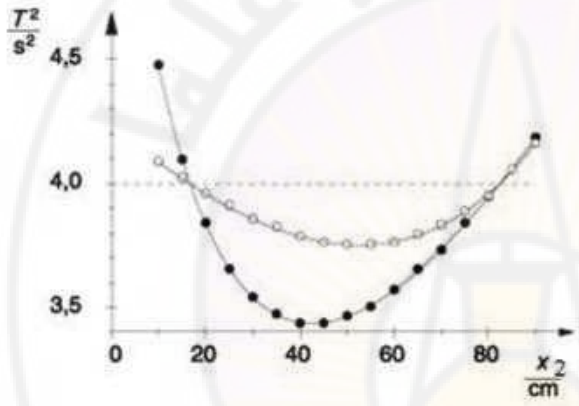
2. عين نقطتي تقاطع المنحنيين السابقين وبما أن كل نقطة تقاطع للمنحنيين يكون فيها للدور نفس القيمة فإن فاصلتي نقطتي التقاطع هما المختلفتان، وتمثل هاتان الفاصلتان المسافتين h و h' بحيث تحققان العلاقة (18) ومِنْ ثَمَّ فإن مجموع هاتين المسافتين وفقاً لهذه العلاقة أو وفقاً للشكل 1 أو وفقاً لتعريف النواس المركب العكوس (كون الدورين متساويين في هذه الحالة)

يساوي الطول المختزل للنواس المركب العكوس، وتعد هذه الطريقة هي الطريقة المستخدمة لتعيين الطول المختزل للنواس المركب.

3. احسب الطول المختزل للنواس المركب العكوس في هذه الحالة ثم احسب الخطأ المرتكب في تعيينه، ثم اشرح ماذا يمثل الطول المختزل للنواس المركب.

4. عين مربع دوري نقطتي تقاطع المنحنيين، ويجب أن يكون مربعا دوري نقطتي التقاطع متساويين $T_1 = T_2 = T$ وإذا لم يتساو مربّعا الدورين تماماً نقوم بحساب القيمة الوسطى لمربعي دوري نقطتي تقاطع المنحنيين.

5. احسب تسارع الجاذبية الأرضية من العلاقة (22)، وذلك بعد حساب الطول المختزل وتعيين مربع دوري نقطتي التقاطع الذي يجب أن يكونا متساويين من أجل نقطتي التقاطع، وإذا لم يتساوَ مربّعا الدورين تماماً نقوم بحساب القيمة الوسطى لمربعي دوري نقطتي تقاطع المنحنيين، ثم الخطأ النسبي المرتكب في تسارع الجاذبية الأرضية بالاعتماد على طريقة التفاضل اللغارتمي.



الشكل5. تغيرات مربعي دوري اهتزاز النواس

يبين الشكل5 تغيرات مربعي دوري اهتزاز النواس T_1^2 و T_2^2 وذلك بدلالة البعد الذي يفصل الكتلة الثانية عن نقطة التعليق. وكما نلحظ فإن نقطتي تقاطع المنحنيين تعطيان نفس قيمة الدور تقريباً ومجموع فاصلتي نقطتي التعليق يعطي الطول المختزل للنواس المركب العكوس.

التجربة (4)

الحركة الدورانية لجسم صُلْب حول محور ثابت

1. هدف التجربة

التحقق من قانون نيوتن الثاني في الحركة الدورانية.

2. المبدأ النظري

(راجع المبدأ النظري للحركة الاهتزازية للنواس المركب في التجربة الأولى)

يمكن البدء عند دراسة التحريك الدوراني لجسم (قرص) يدور حول محور، بوصف تحريك كل نقطة (أو جسيم) وتطبيق قانون نيوتن في التحريك عليها، ثم الجمع المتجه على جميع النقاط (الجسيمات) المكونة للجسم، فتحذف قوى الفعل ورد الفعل الداخلية لتبقى القوى الخارجية وعزومها فقط. إن هذه الطريقة بسيطة وسهلة الإيضاح في حالة خاصة عندما يمر محور الدوران من مركز كتلة الجسم، حيث تكون السرعات الزاوية للنقاط وتسارعاتها الزاوية متماثلة، ومِنْ ثَمَّ يمكن إخراجها خارج إشارة الجمع، وتكون محمولة على محور الدوران. نحصل في هذه الحالة على علاقة بين عزوم القوى الخارجية $\vec{\tau}$ المؤثرة في القرص والتسارع الزاوي $\vec{\alpha}$ المحمولين على محور الدوران نفسه وثابت التناسب ليس إلّا عزم عطالة الجسم بالنسبة لهذا المحور $\vec{\tau} = J\vec{\alpha}$.

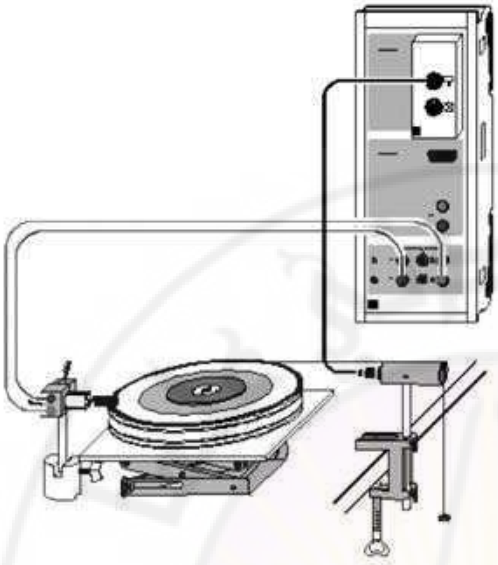
إن الغاية من هذه التجربة هو التحقق من هذا القانون إمّا بتغيير عزوم القوى المطبقة على قرص عزم عطالته ثابت وقياس تسارعه الزاوي المقابل في كل مرة وإمّا بتثبيت عزم القوى وتغيير عزم عطالة القرص (بإضافة أقراص أخرى) وقياس تسارعه الزاوي.

يتم في هذه التجربة تسريع جسم دوّار، عزم عطالته J ثابت بتطبيق عزوم قوى $\vec{\tau}$ مختلفة القيم. يتم رسم التسارعات الزاويّة $\vec{\alpha}$ المقيسة بدلالة العزوم المطبقة. يُلْحَظُ أن العزوم المطبقة $\vec{\tau}$ تتناسب طردياً مع $\vec{\alpha}$ (وعامل التناسب هو J)، الأمر الذي يؤكد معادلة نيوتن للحركة $\vec{\tau} = J\vec{\alpha}$. وبما أنها محمولة على المحور ذاته، فالعلاقة جبرية أيضاً.

من ناحية أخرى يمكن تثبيت عزوم القوى الخارجية $\vec{\tau}$ وتغيير عزم العطالة J. ومِنْ ثَمَّ تكون النتيجة $J \propto 1/\alpha$، وثابت التناسب هو $|\vec{\tau}|$.

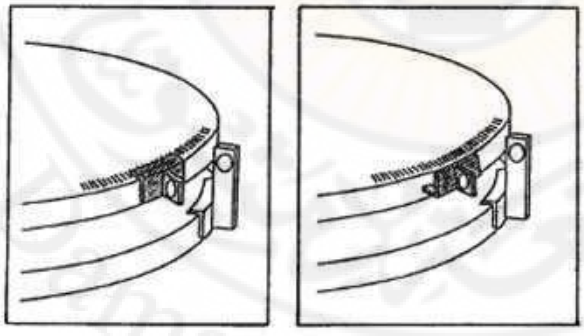
3. الأدوات والأجهزة (الشكل1a)

1- حساس كاسيCASSY وكاسي لاب CASSY LAB (راجع الملحق1 في نهاية التجربة)، 2- علبة BMW (راجع الملحق2 في نهاية التجربة)، 3- نموذج دوران (قرص دوّار مع مجموعة أقراص لإضافية)، 4- كاشف الحركة (راجع الملحق3 في نهاية التجربة)، 5- كابل محوري سداسي الأقطاب، 6- مغنطيس تثبيت القرص قبل البدء بالحركة (راجع الملحق4 في نهاية التجربة).



الشكل1a. حساس كاسي والقرص الدوّار

7- قضيب حامل، 8- قاعدة لتثبيت القضيب الحامل، 9- ملزمة تثبيت بسيطة لكاشف الحركة، 10- منصة مخبرية، 11- سلكان بطول متر واحد، 12- ملقط مغنطيسي للورق مثبت على نموذج الدوران، 13- حاسب بنوافذ **windows** مناسبة .



الشكل1b. نموذج الدوران

4. طريقة العمل

1. يربط الخيط الناقل للحركة إلى علامة نموذج الدوران المستطيلة الشكل والسوداء اللون (الشكل1) $r = 10cm$ أو إلى أحد دبابيس القرص الإضافي ($r = 5\,cm$ أو $r = 2.5\,cm$) ويمرَّر فوق عجلة كاشف الحركة (الشكل1a) الموصول إلى حساس كاسي (الشكل2) (راجع الملحق1) عن طريق المقبس العلوي في العلبة BMW (الشكل3). من شأن

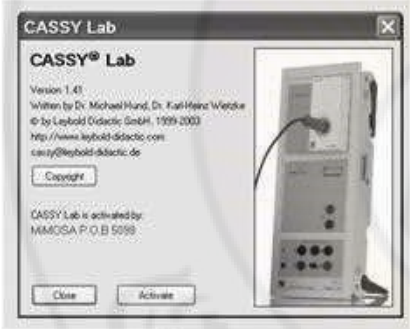
مغنطيس التثبيت أن يمنع بدء الدوران عندما يكون قريباً من ملقط الورق المغنطيسي في الشكل1b.

2. قياس التسارع الزاوي مع تغيير عزوم القوى. يتم تسريع القرص بتعليق كتلة m صغيرة (وتحسب قوة ثقلها $F = \mathrm{mg\,N}$). يتم تطبيق عزوم قوى التدوير المختلفة بثبات عزم العطالة، ولكن باستخدام أنصاف أقطار مختلفة للبكرة: ففي حالة نصف القطر $r = 10cm$، يكون $\tau = rF\,(mmN)$، وفي حالة نصف القطر $r = 5cm$ و نصف القطر $r = 2.5cm$ يعاد حساب عزم القوة، بواحدة الملمتر نيوتن.

3. قياس التسارع الزاوي مع تغيير عزوم العطالة. يتم تسريع القرص في هذه الحالة بتثبيت عزم القوة المطبق من خلال تعليق الكتلة m نفسها وبتثبيت نصف قطر الدوران، وتغيير عزوم العطالة باستخدام أقراص إضافية.

البرنامج المستخدم ومراحل إجراء التجربة

1. المرحلة الأولى:

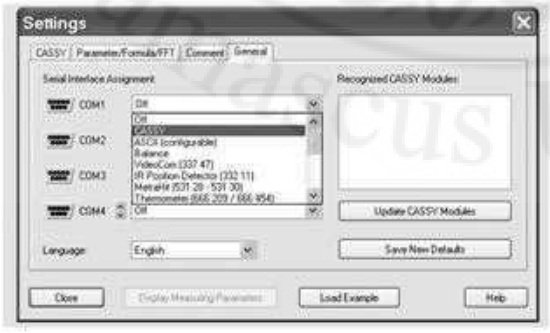


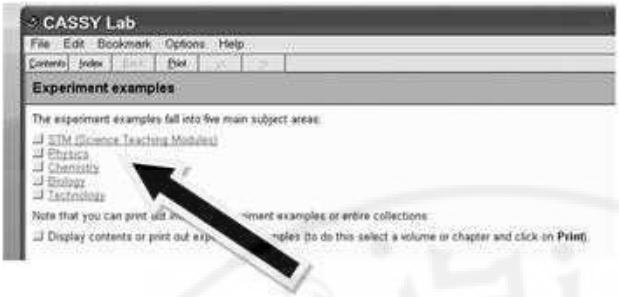
نضغط على أيقونة البرنامج CASSY Lab وننتظر حتى الحصول على الرسالة إلى اليسار:

نضغط على close فتظهر الرسالة التالية:



نضغط على موافق، فتظهر الرسالة التالية التي يظهر فيها الخيار المطلوب (cassy). ثم نضغط في النافذة على خيار load example.



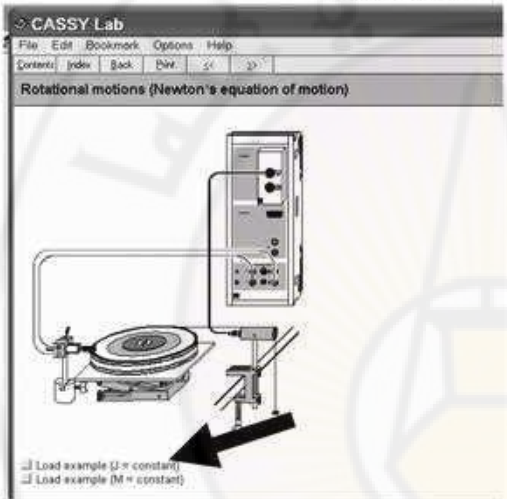


عندها تظهر لدينا الشاشة التالية:

نضغط منها على physics

نختار منها:

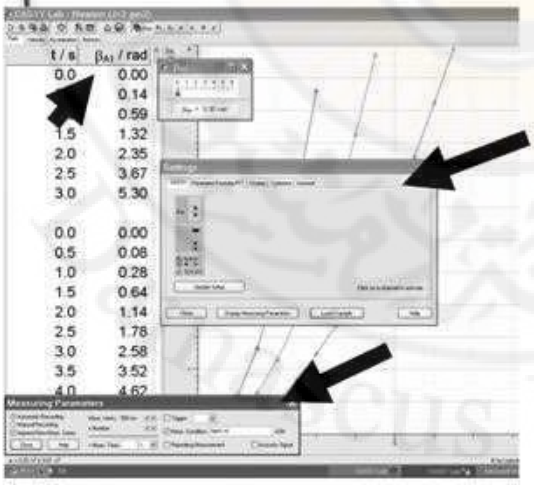
Rotational motions (Newton's equation of motion)



نختار من الحركة الدورانية تثبيت J.. (الخيار الأول)

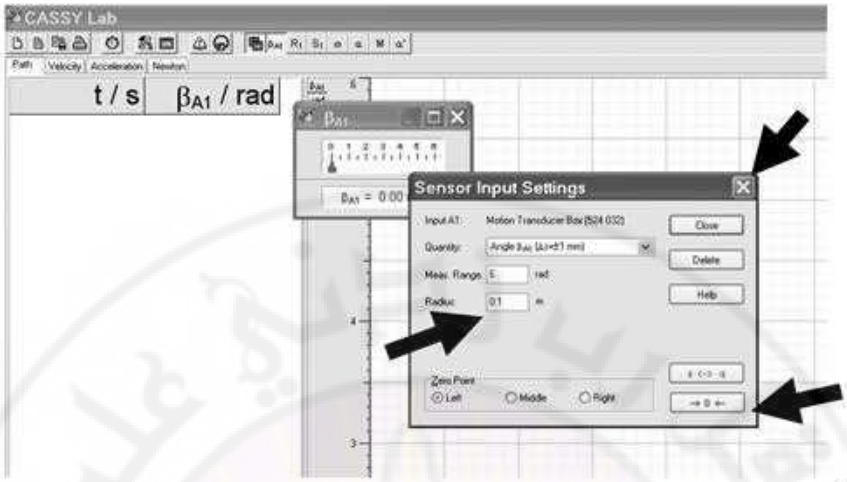
فتظهر الشاشة التالية: نغلق النافذتين المشار إليهما بالسهمين، ثم نفتح صفحة جديدة.

نقوم بعد ذلك بلف الخيط على أحد الأقراص السوداء الثلاثة في التجربة ذات أنصاف الأقطار التالية (0.05, 0.025, 0.0125m).

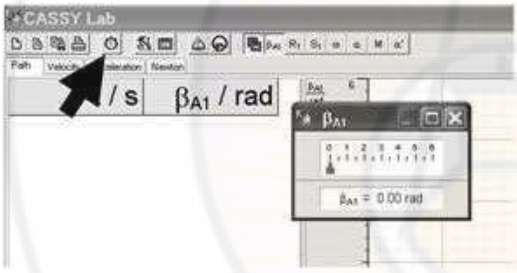


- نقوم بإدخال نصف قطر القرص الذي نلف عليه الخيط، ثم نضغط على زر التصفير، ثم نغلق النافذة.

- ثم نضغط على أيقونة بدء القياس المشار إليها في الشكل التالي، وهي على شكل ساعة. فيتحرر القرص من المغنطيس بشكل آلي، ويدور ويقوم البرنامج في تلك الأثناء برسم الشكل الذي يظهر على شكل جزء من قطع مكافىء.

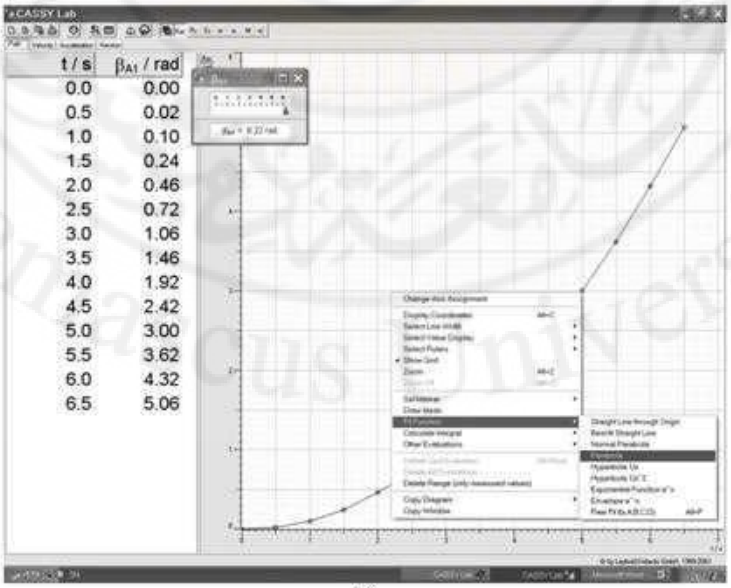


– بعد أن يدور القرص دورة كاملة نقوم بإيقاف القياس من خلال الضغط على نفس زر البدء السابق.

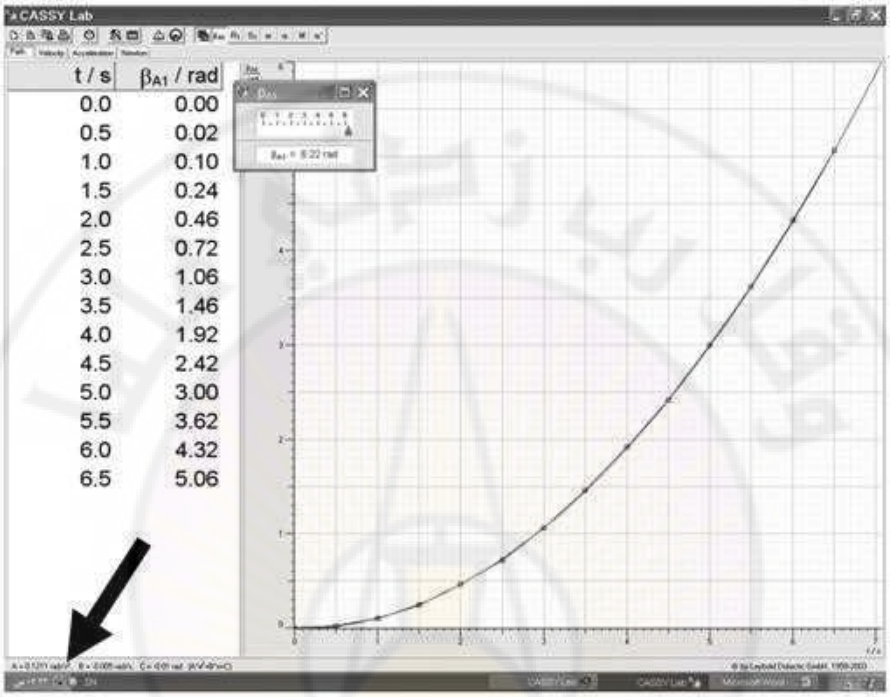


تكون النتيجة على الشكل التالي:

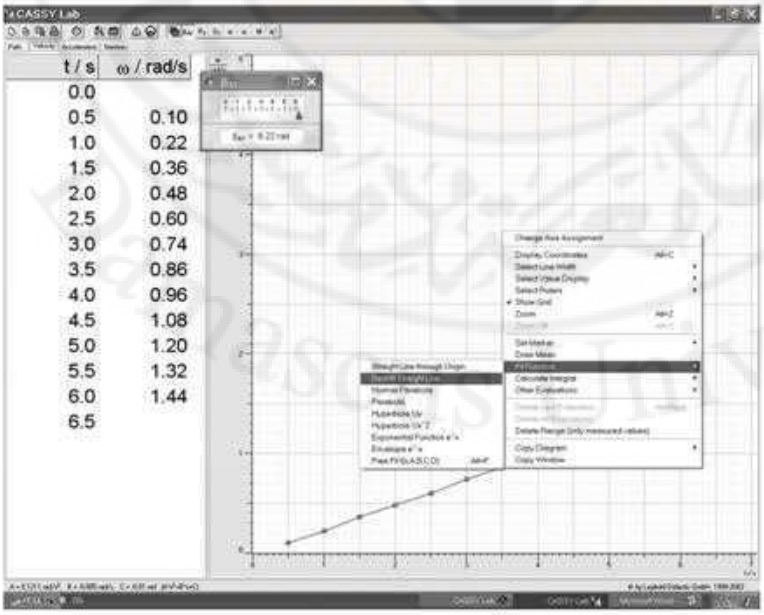
حيث نحدد نقطة من المنحني ونضغط الزر اليميني للماوس ونختار fit Function. ومنه نختار parpola.



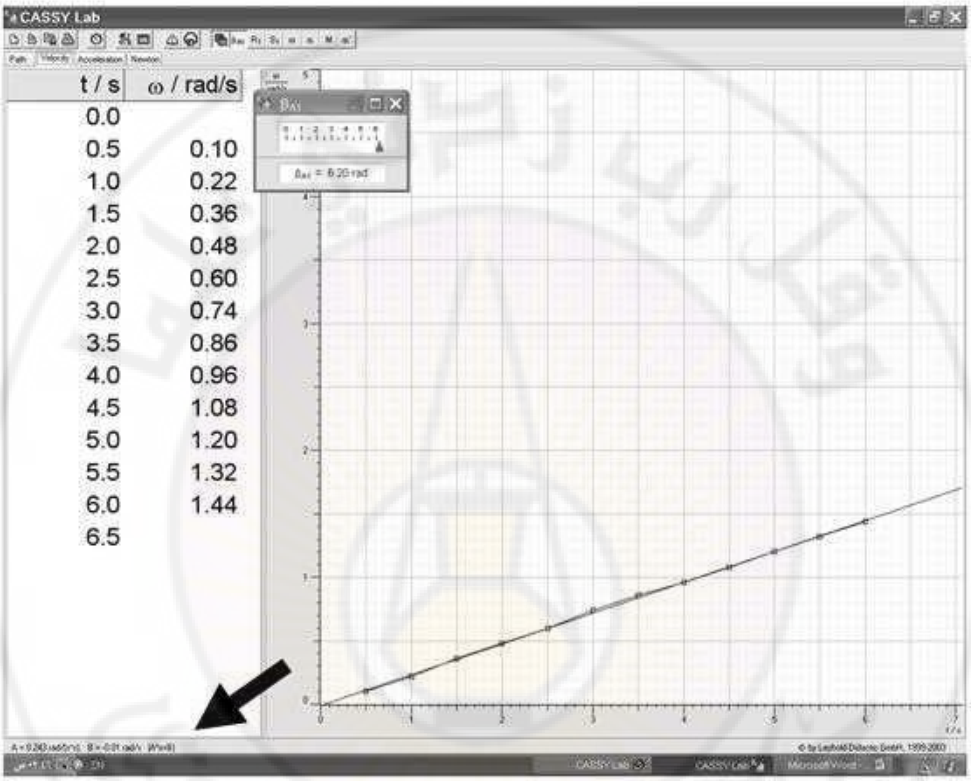
بعد ذلك نحدد كامل القطع، فنحصل على معامل القطع الذي يمثل قيمة $\frac{1}{2}\alpha$ المشار إليها بالسهم كما في الشكل:



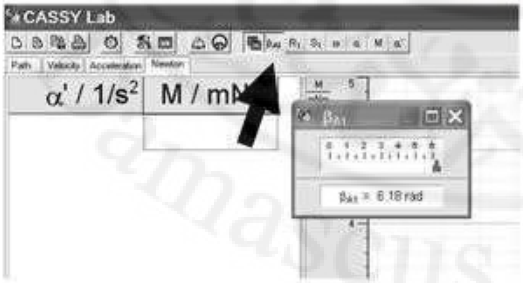
يمكن بالإضافة لذلك تحديد قيمة التسارع الزاوي بطريقة أخرى وذلك بالضغط على velocity فيظهر الشكل التالي، ونختار من المستقيم نقطة نضغط عليها بالزر اليميني. ونأخذ خيار fit function ثم best- fit straight line كما في الشكل.



ثم نحدد المستقيم بالكامل، ونأخذ قيمة الميل الذي يدل عليه السهم في الشكل فيمثل الميل في هذه الحالة قيمة التسارع الزاوي α. وسجل النتائج في الجدول1.



نكرر نفس الاجراءات السابقة من أجل أنصاف الأقطار المختلفة.



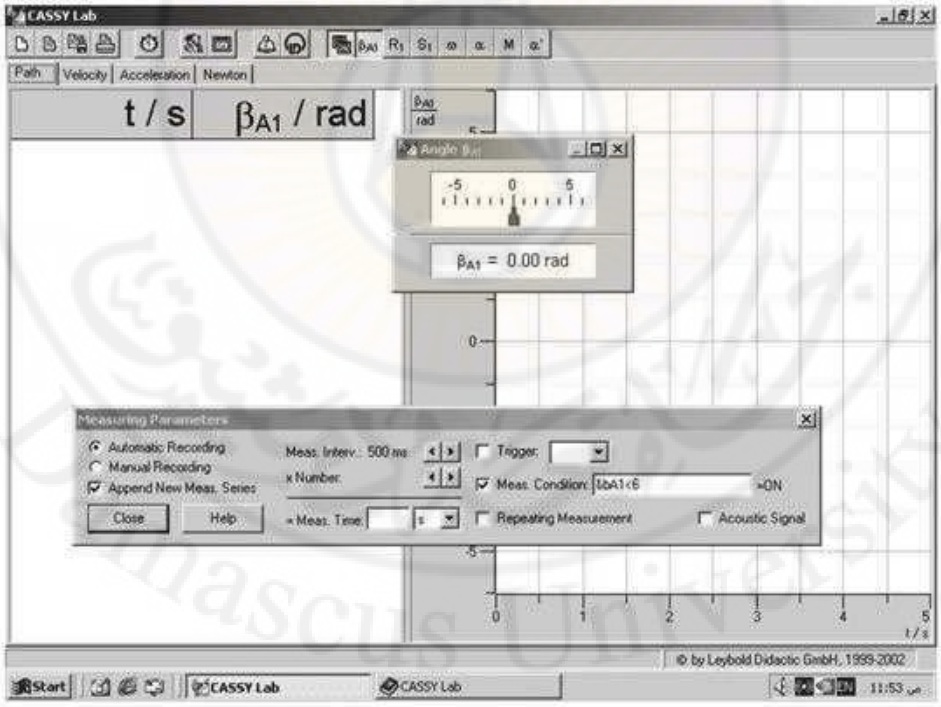
2. الخطوة الثانية

نقوم بحساب عزوم القوة من العلاقة: $\tau = rF$، و τ من أجل انصاف الاقطار (0.05, 0.025, 0.0125m).

ونسجل قيم α من التجارب الثلاث السابقة من أجل كل قيمة لعزم القوة في الجدول-1، ثم نقوم برسم τ بدلالة α. حيث تتم عملية الرسم بأيقونة نيوتن التي تظهر في الشكل السابق كما يلي:

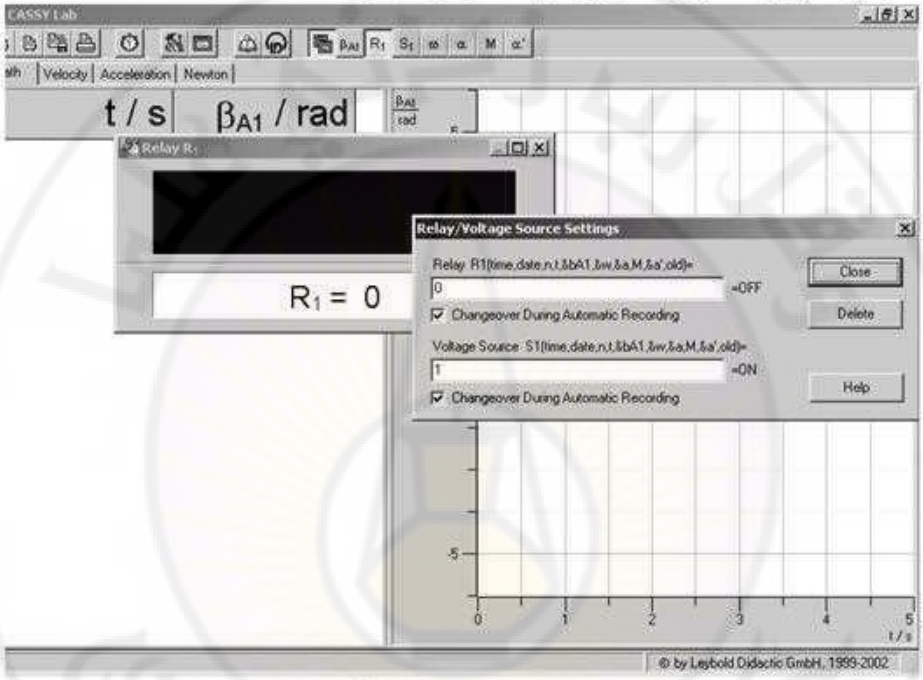
ندخل القيم التي حصلنا عليها، ونرسم الخط البياني لنحصل على مستقيم، من ميل المستقيم نحسب عزم العطالة للنموذج الدوار بدون أقراص إضافية J_0 وضعها في الجدول نفسه.

ربما تحتاج لتعديل الفاصل الزمني Meas. Interv.:500ms الحالي بين القياسات ضمن مربع الحوار الخاص **بمتحولات القياس Measuring parameters** (الذي يمكن الوصول إليه عن طريق F5 أو عن طريق الأيقونة المشار إليها على الشكل السابق في أعلى الصفحة الجديدة) (انظر الشكل التالي مباشرة). **يجدر بالذكر أنه بقدر ما يكون الفاصل بين القياسات أكبر يكون عدد قيم التسارع الزاوي التي يمكن قياسها بدلالة الزمن $\alpha(t)$ أقل.** يظهر على هذا المربع أن القياسات تجري عند الزوايا التي تقل عن 6rad، حيث يستدل على ذلك من الرمز $b_{A1}<6$ & حيث يحل الرمز b & محل β الذي كان يظهر على مربع الحوار الخاص بالحساس، وهذا أمر ينطبق على أنصاف أقطار الدوران الستة، لنموذج الدوران.



يسمح للقرص الدوّار بالتحرر من مغنطيس التثبيت بشكل آلي لحظة بدء الحركة، وذلك بالنقر المسبق على الأيقونة R_1 على الشريط العلوي من الصفحة الجديدة، ثم النقر في المستطيل

الأسود من شاشة الحوار بالزر الأيمن للماوس، فتحصل على المربع الخاص بإعدادات مبدل منبع الكمون (انظر الشكل التالي مباشرة) Relay/ voltage source settings، ثم التأشير على المربع Changeover During Automatic Recording الذي من شأنه أن يوقف الحقل المغنطيسي الذي يثبت قرص الدوران، ويدعه يتحرك بحرية.



يتم بدء القياس بالنقر على F9 (يمكن بدء القياس أيضاً بالنقر على رمز المؤقت في الشريط العلوي للصفحة الجديدة)، في حين يتوقف القياس بالنقر ثانية على F9 (يمكن إيقافه أيضاً بالنقر ثانية على رمز المؤقت) لدى الانتهاء من تسجيل القياسات الخاصة بكل حالة في التجربة. يمكن مسح سلسلة القياسات الخاطئة من الجدول من خلال Delete last measurement series (بالنقر على الجدول بالزر الأيمن للماوس).

- سيظهر على الشاشة منحني $\theta = \theta(t)$ الذي يمثل جزءاً من قطع مكافئ $\theta = \frac{1}{2}\alpha t^2$، يحسب البرنامج $\frac{1}{2}\alpha$ ويسجلها إلى جانب المنحني.
- كرر التجربة من أجل أنصاف أقطار مختلفة (عزوم تدوير مختلفة).
- سجل القياسات السابقة في جدول.

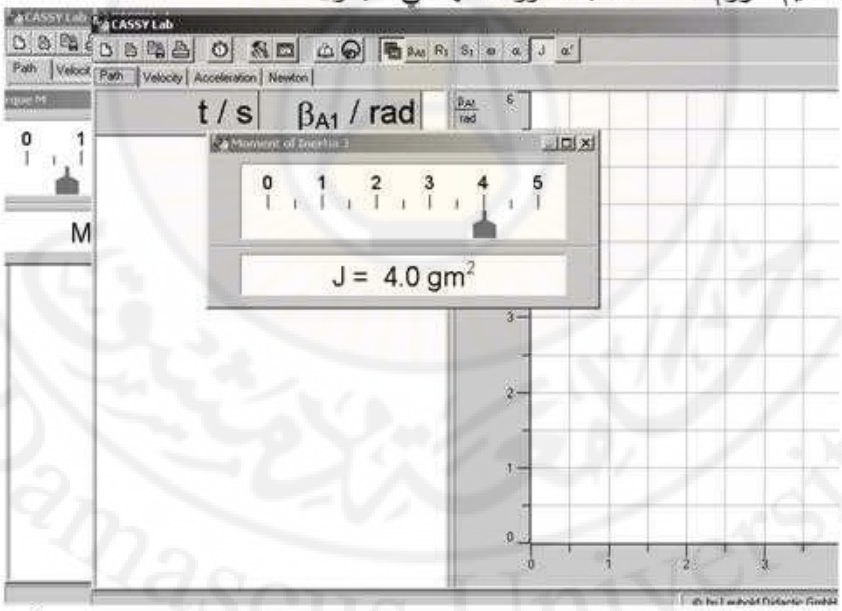
الجدول1

$m =$ و g $J_0 =$ gm^2		
$r(m)$	$\tau = rmg(mmN)$	$\alpha(rads^{-2})$
0.0125		
0.0250		
0.0500		
0.1000		

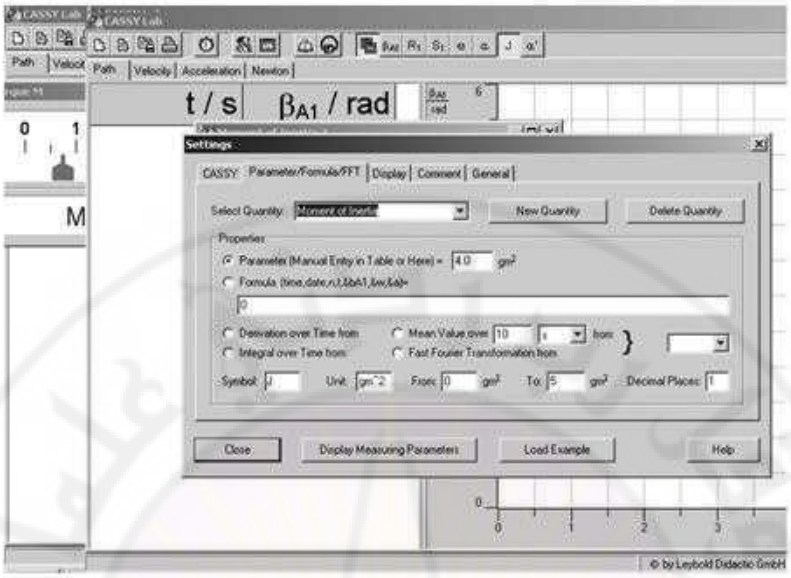
تحسب قيمة J_0 من ميل الخط البياني $\tau(\alpha)$ وذلك بواحدة gm^2 وتسجل في الجدول السابق.

3. الخطوة الثالثة

كرر ما سبق بتثبيت عزم القوة وتغيير عزم العطالة بإضافة المزيد من الأقراص، أو تخفيض عددها، وإدخال المعطيات المناسبة على مربعات الحوار الموافقة، والتي يتم الحصول عليها بالنقر على الرمز J في أعلى شريط الصفحة والنقر بالزر الأيمن للماوس. وذلك بعد أن تكون قد حسبت قيم عزوم العطالة للجملة ووضعتها في الجدول-2



وعند وضع كل قيمة لعزم العطالة قم بتكرار قياس تسارع الزاوي كما في الخطوة الأولى وضع نتائجك في الجدول2.



الجدول 2

$m=$ و g $r=$ و m		
$J(gm^2)$	$\alpha(rads^{-2})$	$1/\alpha(rad^{-1}s^2)$
$J_0=$		
$J_0+J_1=$		
$J_0+J_2+J_3=$		
$J_0+J_2+J_3+J_4=$		

ارسم تحولات عزم العطالة بدلالة مقلوب قيم التسارع الزاوي الموجودة في الجدول2، باستخدام أيقونة نيوتن وقم بموائمة النتائج لأفضل خط مستقيم واحسب ميل الخط الناتج.

ملاحظة: يمكن رسم المرحلتين على ورقة ميلمترية في حال لم يتم الرسم باستخدام الحاسب.

5. تحليل النتائج والمناقشة

يقوم برنامج CASSY-Lab، بالإضافة إلى حساب المخططات $\beta(t)$ التي تمثل $\theta(t)$، بحساب مخططات كل من $\alpha(t)$ و $\omega(t)$ التي يمكن رؤيتها بمجرد النقر على جداول العروض الأخرى من توابع التقويم الأخرى parabola and line fits و calculation of mean value.

1. للتحقق من معادلة نيوتن للحركة تحتاج إلى ملء جدول آخر، وهو جدول يتم تحضيره مسبقاً على جدول عرض نيوتن. بعد تحديد قيمة التسارع الزاوي كقيمة وسطى للمخطط $\alpha(t)$

أو ميل المخطط $\omega(t)$ يمكن استخدام الماوس لسحب هذه النتيجة من status line وإسقاطها في الجدول. يمكن إدخال قيمة العزم الزاوي τ أو عزم العطالة مباشرة عن طريق لوحة المفاتيح، ويتم توليد المنحني البياني المطلوب حال إدخال هذه القيم. يمكن بسهولة تحويل أو إعادة مقياس المحاور بالضغط عليها بالزر الأيمن للماوس ($\alpha \to 1/\alpha$ مثلاً).

2. يمكن تقييم النتائج بطريقة أخرى: حيث يمكن مقارنة تغير طاقة الدوران والتي تكون طاقة حركية بحتة(لماذا؟) مع العمل المنجز باستخدام وظيفة العلاقات *formulas* من البرنامج. حيث يعبر عن الطاقة الدورانية أو تغيرها بالنسبة للمبدأ بالعلاقة:

$$E = 0.5 * J * \&w\text{^}2$$

أدخل القيمة العددية لـ J ، $\&w$ تدل على ω. ويتم حساب العمل من العلاقة: $W = \tau * \&b_{A1}$. أدخل القيمة العددية لـ τ من لوحة المفاتيح، $\&b$ تدل على β. وذلك لنفس التجربة.

3. وازن بين المقدارين تغير الطاقة الدورانية والعمل بعد تقدير الخطأ في كل منهما.

4. احسب الارتياب المرتكب في تحديد قيمة عزم عطالة النموذج الدوار بدون أقراص إضافية J_0. واكتب النتيجة النهائية بالشكل $J_0 = \bar{J}_0 \pm \Delta J_0$.

5. اذكر ماذا يمثل تحولات عزم العطالة بدلالة مقلوب التسارع الزاوي واحسب الارتياب المرتكب في تعيينه.

الملحق1. حساس كاسي ومختبر كاسي: وحدة القياس والتقويم Cassy-s بمساعدة الحاسب

1. وصف هذه الوحدة

تتكون هذه الوحدة من برمجيات مختبر كاسي CASSY LAB 524200 ومن وحدة الحساسCASSY أو أكثر يمكن وصلها إلى حاسب عن طريق بوابة *USB* أو وصلة بينية تسلسلية ومن منبع تغذية كاسي. يمكن من جهة أخرى استخدام هذه الوحدات دون حاسب في حال استخدام شاشة كاسي. وبحسب مقتضيات القياس يمكن وصل عدد من وحدات حساس كاسي أو منابع تغذية كاسي قد يصل إلى ثماني وحدات.



الشكل2. وحدة كاسي

يمكن لمختبر كاسي أن يدعم أيضاً الأدوات الأخرى التي توصل إلى السطح البيني التسلسلي للحاسب (كالموازين الإلكترونية أو كواشف الموضع تحت الحمراء)، ويمكن استخدامها بشكل مستقل عن CASSY-s .

ملاحظات الأمان

لا يمكن في الحالة الراهنة لهندسة البرمجيات، ضمان أخطاء المنتج. ولهذا فإن Leybold Didactic Gmbh غير مسؤولة عن الأعطال التي تنجم عن تنصيب CASSY LAB 524200 أو استخدامه.

ولأمانك الخاص بالكهرباء:

- **لا تطبق كمونات أعلى من 100 فولط على وحدات كاسي. يمكن وصل عدة وحدات كاسي على التسلسل بقبس إحداها بالأخرى. إذا لم تكن الوحدة المتعاقبة مركبة ضمن إطار تجربة، فإن الاستقرارية الميكانيكية لهذا الاقتران كافية لإجراء التجارب ولكن ليس للنقل.**
- **لا تنقل إلّا وحدات كاسي المتعاقبة والمركبة ضمن إطار تجربة معينة. أو انقل وحدات كاسي كلاً على حدة.**
- **يمكن لحساس كاسي أن يزود حساس كاسي مجاور بالطاقة طالما أن التيار المار أقل من $1.6A$ (وحدتان على الأكثر، الفصل في حالة الحمولة الزائدة).**

يجب تزويد الوحدات الإضافية بالطاقة بشكل منفصل.

2. تنصيب CASSY LAB

توصل الكاسي S بالحاسب، تبعاً لموديلها، بكابل *USB* المرافق عن طريق بوابة *USB* أو بكابل توصيل بتسعة أقطاب عن طريق الوصلة البينية التسلسلية *RS*232. إذا كان الحاسب الشخصي يضم مقبساً بـ25 قطباً فيجب شراء ملئم أو محول قياس من محل الحواسب.

إذا كان ممكناً لا تستخدم إلّا وحدة القابس المرافقة (*12V*/*1.6A*) كمنبع للتغذية.

يمكن استخدام عدد من وحدات كاسي التي توصل فيما بينها بقبس إحداها بالأخرى ومِنْ ثَمَّ لا تتطلب إلّا بوابة *USB* واحدة أو وصلة بينية واحدة. وبحسب استهلاك وحدة حساس كاسي للطاقة يمكن تغذية وحدة حساس كاسي واحدة أو اثنتين منها بقابس واحد. فإذا استخدم أكثر من وحدتين توصل وحدات قابسة أخرى.

إن برمجيات مختبر CASSY ليست إلّا برمجيات ويندوز بـ 32 بتة ومِنْ ثَمَّ يمكن تشغيلها بنظم ويندوز 95 فما فوق. إن وحدات *USB CASSY* تدعمها الويندوز السابقة.

يتم تنصيب مختبر كاسي آلياً بإدخال *CASSYLAB CD – ROM* أو يدوياً ببدء *SETUP_EXE* وباتباع التعليمات على الشاشة. ومِنْ ثَمَّ يتم تشكيل البرنامج تحت *Start → programs → CASSY LAB*

إذا لم ينفذ اختبار التوصيل في أثناء التنصيب، فإنه يترتب إدخال الوصلة البينية (COM2 مثلاً) التي توصل الوحدة *CASSY_s* بها. (يمكن حفظ هذه الإعدادات عن طريق حفظ الافتراضات الجديدة). غير أنه يمكن التعرف على وحدة USB CASSY آلياً.

3. رمز التفعيل

يترتب في أثناء تنصيب البرمجية أو بعده تفعيل كاسيلاب لاستخدامه مع *CASSY_s*. يمكن استخدام *CASSY LAB* بشكل مؤقت (20 دورة كحد أعظمي) دون تفعيل. لا يوجد حدود لاستخدام *CASSY LAB* جنباً إلى جنب مع الأدوات الأخرى (كما في حالة الموازين الكهربائية، وكاشف الموضع تحت الأحمر، والقياسات اليدوية) دون تفعيل.

إن اسم ورمز التفعيل اللازمين للتفعيل يتوافران على وثيقة منفصلة – مع ملاحظات التسليم وقائمة مبيعات كاسي لاب)، فإذا لم يكن لديك رمز التفعيل، أرسل فاكساً لمبيعات كاسي لاب على +492233604603.

الملحق2. العلبة BMW-box 524 032

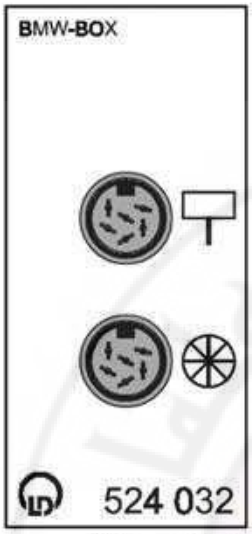
1. وصفها

تستخدم العلبة BMW جنباً إلى جنب مع نظام القياس كاسي بالاستعانة بالحاسب.

يمكن لهذه العلبة أن توصل مقابس كواشف الحركة السداسية الأقطاب إلى مداخل مؤقت كاسي.

إن هذا الحساس كعضو في أسرة كاسي يتمتع بالملامح التالية

- يمكن الحصول على كل من كمون التغذية وخطوط التحكم ونقل المعطيات عن طريق وصلة وحيدة بخمسة عشر قطباً.
- يمكن وصل العلبة بالحساس بوصلة 15-pin تقع على السطح البيني لوحدة كاسي.
- يمكن وصل العلبة في أي لحظة.
- تتعرف برمجيات كاسي على العلبة بشكل آلي عن طريق كود التعرف عليها.
- تهيأ مجالات القياس باستخدام قائمة برمجيات كاسي.
- برمجيات كاسي تشرح كيفية استخدام العلبة.



الشكل3 . العلبة BMW

2. الحساسات التي يمكن استخدامها

يلزم أيضاً كابل محوري بستة دبابيس



3. المعطيات الفنية

تضم مقبسين *pinDIN* – 6 لوصل كل من الحساسين.

الملحق3. كاشف الحركة337631

لدى إجراء التجربة بالاستعانة بالحاسب يمكن إدخال المعلومات الرقمية المتعلقة بسير الحركة التي يوفرها كاشف الحركة إلى الحاسب عن طريق وصلة بينية للكاسي (524007مثلاً)

الموصولة بالعلبة *BMW*524 مباشرة من دون تحويل إلى كمونات تمثيلية. وباستخدام برنامج مخصص لهذا الغرض يمكن معالجة هذه المعلومات بحيث تعرض كميات المسار والزمن والسرعة والتسارع بشكل صحيح بدلالة قيمها العددية والبعدية

مبدأ القياس

يجري انتقال حركة جسم ما إلى كاشف الحركة عن طريق عجلة شعاعية احتكاكها مهمل يجري مسحها بحاجزين ضوئيين صغيرين. يجري إحصاء عدد إعتامات الحاجزين الضوئيين بالحاسب كقياس للحركة يتم عرضه كمسار (بعد معالجة الإشارات الرقمية بالحاسب). تتعين السرعة من عدد الإعتامات في وحدة الزمن والتسارع من التغير في معدل العد على الزمن.

تستخدم العجلة في عدة أنواع من كواشف الحركة في قياس المسافات المقطوعة بدلالة الزمن، وتعمل في هذه الحالة كبكرة توجيه لخيط يمرر على حز في محيطها. يتم في أثناء تسجيل المعطيات بحساس كاسي وعلبة المؤقت، مسح الإطار الداخلي للعجلة بحاجز ضوئي وتقاس الحركة بمقدرة فاصلة تقدر بنحو سنتمتر واحد من دون الكشف عن اتجاه الحركة.

وإذا كان يتم تسجيل الحركة بحساس كاسي عن طريق علبة ترجام الحركة 524032 فإنه يتم مسح الإطار الخارجي للعجلة بحاجزين ضوئيين منزاحين في الطور، وتقاس الحركة بمقدرة فاصلة تقدر بنحو ملمتر واحد مع الكشف عن اتجاه الحركة. تشكل جملة العجلة وحاملها (463 337) بكرة توجيه.



الشكل4. العجلة الشعاعية1. المحور 2. المسند 3. الإطار الداخلي، 4. الإطار الخارجي 5. حز تمرير الخيط على الإطار

المواصفات الفنية للعجلة

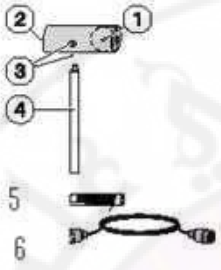
ترتكز العجلة على محور إبري، نصف قطر الحز الواقع على محيطها 25.5mm. تقدر تقسيمة الإطار الخارجي بـ°9 ويقابلها على المحيط 4mm، ويبلغ عدد ثقوبها 40 ثقباً. تقدر الزاوية المقابلة لتقسيمة الإطار الداخلي بنحو°22.5، ويقابلها على المحيط 10 mm ويبلغ عدد ثقوب الإطار الداخلي16 ثقباً.

مثال تطبيقي

يستخدم كاشف الحركة في الحركات الدورانية مع نموذج الدوران.

يتكون العنصر الحساس (الشكل5a) للحركة من:

1. عجلة شعاعية (بأشعة) كحساس للحركة مركبة على مسندين إبريين needle bearing بين حاجزين ضوئيين صغريين قطرها الفعال (حز الخيط) $29.3mm$، الكتلة المكافئة للعجلة $1g$.
2. مقبس للكابل المحوري السداسي الأقطاب الذي يوصل بمختبر كاسي لاب عن طريق العلبة $BMW524032$ لمعالجة المعلومات الرقمية التي يوفرها العنصر الحساس للحركة في الحاسب.
3. فتحات لولبية لتثبيت القضيب الحامل.
4. قضيب حامل $(12cm \times 1cm\, dia)$ لولبي لتثبيته في الفتحات اللولبية.
5. خيط برلون.
6. كابل محوري بستة أقطاب طوله $1.5m$ لوصل العنصر الحساس للحركة بالوصلة البينية بوحدة كاسي عن طريق العلبة $BMW524032$. أبعاد علبة كاشف الحركة $8cm \times 3cm$ dia ووزنها $0.15kg$.



الشكل5a. العنصر الحساس للحركة

إعداد كاشف الحركة

يتم إعداد العنصر الحساس للحركة عل الحامل في ترتيب التجربة بحيث تنتقل حركة جسم التجربة دون انزلاق عن طريق خيط على العجلة الشعاعية وفقاً لما هو مبين في الشكل5b.



الشكل5b.كاشف الحركة

يمرر الخيط على العجلة من خلال الحز المخصص له بحيث ينتقل في مستوي الحز المخصص للخيط.

الملحق 4. مغنطيس التثبيت

يستخدم مغنطيس التثبيت في التجارب الدينميكية لتثبيت الأجسام الحديدية التي تخضع إلى قوة (كقوة الثقالة الأرضية أو القوة التي يطبقها نابض) وبقطع التيار عن المغنطيس الكهربائي يمكن للجسم أن يبدأ بالحركة في لحظة زمنية محددة تماماً دون أي تأخير.

1. ملاحظة أمان

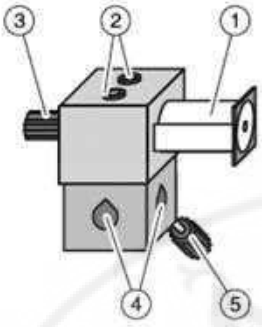
إن كمون التشغيل الأعظمي $16VDC$ (ولفترات قصيرة $20VDC$)

2. وصف المغنطيس

1.2. يتكون من ملف بثلاثة آلاف لفة تقريباً. يبلغ الكمون الأعظمي لتشغيله $16VDC$ (ولفترات قصيرة $20VDC$) والتيار (في الحالة $U=16VDC$: نحو $0.25A$)

2.2. يضم مقبسين $4mm$ لتغذية الملف وزوج من ثنائيات زنر لحماية الملف من النهايات العظمى العابرة.

3.2. نواة حديدية تدخل كالبزال (البرغي) $screw-on$ يمكن عن طريقها تعديل قوة التثبيت بشكل مستمر (في حالة كمونات تغذية ثابتة).



الشكل6. مغنطيس التثبيت

4.2. ثقوب أقطارها $13mm$ لإدخال القضيب الحامل.

5.2. برغي لتثبيت هذه الوحدة على القضيب الحامل.

3. تشغيل المغنطيس

من الأدوات الإضافية المطلوبة:

- الكمون الأعظمي اللازم $16VDC$ $0.25A$، والكمون الأصغري يقع بين $5VDC$ و $10VDC$ وذلك حسب ما تتطلبه التجربة مثلاً:
- علبة تغذية منخفضة الكمون $3/6/9/12V\sim$ أو علبة تغذية $\pm 15DC$

ولقطع تيار الملف والبدء الآني لمؤقت كهربائي مفتاح مورس $50452Morse$

- أدوات استناد لتركيب مغنطيس التثبيت.

التجربة (5)

الجيروسكوب الميكانيكي

الحركة الدورانية لجسم صلب حول نقطة

1. هدف التجربة

1- التعرف على الجيروسكوب الميكانيكي ومميزاته.

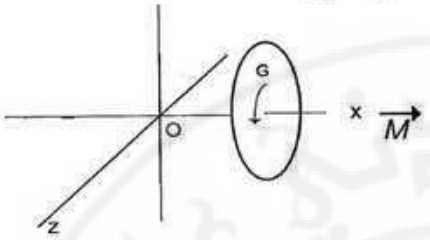
2- تعيين عزم عطالة الجيروسكوب.

3- دراسة حركة المبادرة وتعيين تواتر الدوران وتواتر المبادرة والعلاقة بينهما.

4- دراسة حركة الترنح في الجيروسكوب.

2. المبدأ النظري

الجيروسكوب gyroscope جسم صلب يتحرك حول نقطة ثابتة بحيث يكون فيه أحد عزوم العطالة حول المحاور الرئيسية للعطالة أكبر بكثير من عزمي العطالة الآخرين (محاور العطالة الرئيسية هي ثلاث محاور متعامدة فيما بينها متماسكة مع الجسم الصلب بحيث تكون عزوم العطالة حول هذه المحاور هي المميزة للجسم الصلب) وهذا يؤدي بحسب قانون نيوتن في الحركة الدائرية إلى اندفاع زاوي كبير حول هذا المحور مما يؤدي إلى استقرار في الحركة في حال عدم وجود أي قوى خارجية مؤثرة في الجيروسكوب أو قوى اضطرابية صغيرة. ليكن لدينا الجيروسكوب المبين في الشكل1، وهو عبارة عن قرص معلق من مركزه بقضيب أسطواني يمكن للقرص أن يدور حوله، ويدعى الجيروسكوب



الشكل1. الجيروسكوب

ثلاثي المحاور عندما يمكن أن يدور حول محورين آخرين عموديين على ذلك المحور وتلتقي المحاور في النقطة O وهو موضوع التجربة.

إذا جعل القرص يدور بسرعة كبيرة وثابتة حول محوره يكون الاندفاع الزاوي $\vec{M}$ ثابتاً ومحمولاً على المحور نفسه. في حال عدم وجود عزوم قوى مؤثرة $\vec{\Gamma}$ يكون وفق معادلة نيوتن في الحركة الدورانية:

$$d\vec{M}/dt = \vec{\Gamma}$$

(يجب عند حل هذه المعادلة إسقاطها على مجموعة محاور عطالية)، وفي حال انعدام عزوم القوة المؤثرة تكون العلاقة التالية شعاعية وجبرية ضمن التقريبات المذكورة

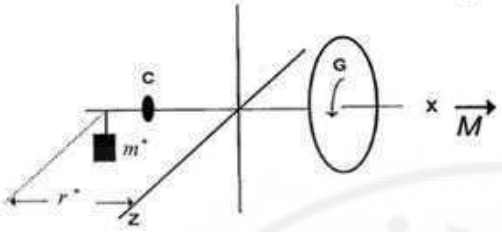
$$\vec{M} = I_p \vec{\omega}_R \qquad (1)$$

يتحقق هذا الأمر في حالة موازنة ثقل القرص الدوّار بثقل مناسب عند الطرف المقابل (الشكل2). ويعني ثبات الاندفاع الزاوي أن الجيروسكوب يحافظ على وضعه مهما كان

اتجاه محور الدوران في البدء.

ولدى إضافة قوة ما إلى أحد جانبي القرص على محور الجيروسكوب، فإن هذه القوة تولد عزماً يؤدي إلى تغير الاندفاع الزاوي، وبفرض أن هذه القوة قوة ثقل كما هو موضح في الشكل2 متجهة نحو الأسفل، فتكون جهة العزم المتولد عمودية على محور الجيروسكوب. ومِنْ ثَمَّ فإن جهة تغير الاندفاع الزاوي عمودية على محور الجيروسكوب. وتدعى هذه الحركة التي يدورها الجيروسكوب بحركة المبادرة، وتتميز بسرعتها الزاوية الخاصة بها. ولاستنتاج السرعة الزاوية للمبادرة يستفاد من التقريب المعرّف للجيروسكوب.

يكون للاندفاع الزاوي في الحالة العامة ثلاث مركبات عند استعمال جملة محاور العطالة الرئيسية معطاة بدلالة عزوم العطالة الرئيسية I_1 و I_2 و I_3 ومركبات شعاع السرعة الزاوية ω_1 و ω_2 و ω_3 هي $I_1\omega_1$ و $I_2\omega_2$ و $I_3\omega_3$، وبما أننا افترضنا أحد عزوم العطالة أكبر بكثير من العزمين الآخرين وكذلك مركبة السرعة الزاوية حوله عالية يمكن افتراض أن القوة العمودية الإضافية لا تغير من طويلة الاندفاع الزاوي وعدّها ثابتة ما يجعل تفاضلها بالنسبة للزمن عمودياً عليها. يمكن استعمال مسقط معادلة نيوتن في الاتجاه العمودي على المحور لتعطي التغير في اتجاه $\vec{M}$ دون أن تغير من طويلته فنجد العلاقة:



الشكل2. عزم القوة يغير الاندفاع الزاوي

$$\frac{dM_z}{dt} = -m^* r^* g \qquad (2)$$

وبما أن رأس الشعاع $\vec{M}$ يقوم بحركة دائرية يمكن التعبير عن دورانها وبالتالي الطرف الأيسر من المعادلة (2) بدلالة الطويلة والسرعة الزاوية المقابلة أي تساوي:

$$(\frac{d\theta}{dt})\|M\|$$

لنحصل أخيراً على السرعة الزاوية للمبادرة وفق المعادلة (3) الاستفادة من المعادلة (1)

$$\vec{\omega}_p = \frac{r^* m^*}{I_P\, \omega_R}\vec{g} \qquad (3)$$

حيث يمثل r^* بعد الثقل المضاف عن النقطة O وتمثل m^* كتلته، وهذا يعني أن معرفة عزم عطالة القرص وقياس سرعته الزاوية وبعد الثقل المضاف يمكننا من حساب عزم العطالة القطبي I_P.

1.2. تعيين عزم عطالة الجيروسكوب مباشرة

إذا جعل قرص الجيروسكوب في حالة دوران حول محور أفقي ثابت نتيجة سقوط كتلة m (الشكل3) معلقة بخيط ملفوف على بكرة متماسكة مع القرص، فإن تسارعه الزاوي

يعطى بالعلاقة:

$$\frac{d\omega_R}{dt} = \alpha = \frac{M}{I_P} \qquad (4)$$

حيث ω_R السرعة الزاوية، α التسارع الزاوي؛ I_P عزم العطالة القطبي؛ وبما أن $M = Fr$ العزم المطبق في هذه الحالة حيث r نصف قطر البكرة و F توتر الخيط. وبحسب قانون الفعل ورد الفعل، ودراسة حركة الثقل تعطى هذه القوة بالعلاقة:

$$\vec{F} = m(\vec{g} - \vec{a}) \qquad (5)$$

حيث g تسارع الجاذبية الأرضية، a تسارع الثقل في المسار. وفي حال كون الخيط غير قابل للامتطاط يرتبط التسارع الزاوي α وتسارع الثقل a بالعلاقتين:

$$a = 2h/t_F^2 \quad و \quad \alpha = a/r \qquad (6)$$

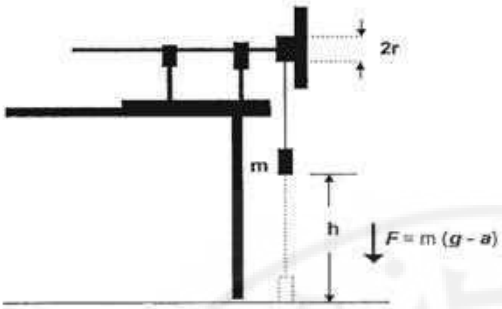
على الترتيب. حيث h ارتفاع السقوط، و t_F زمن السقوط، و r نصف قطر الأسطوانة التي لف عليها الخيط.

بدمج المعادلتين4 و5 في معادلة واحدة نحصل على:

$$t_F^2 = \frac{2I_P + 2mr^2}{mgr^2}h \qquad (7)$$

من ميل المستقيم $t_F^2 = f(h)$، يمكن الحصول على قيمة عزم عطالة قرص الجيروسكوب.

يمكننا أيضاً تعيين عزم عطالة القرص هندسياً وفقاً للعلاقة:



الشكل3. تمثيل تخطيطي لإعداد التجربة لتعيين عزم عطالة قرص الجيروسكوب

$$I_P = \frac{1}{2}MR^2 = \frac{\pi}{2}R^4 d \cdot \rho \qquad (8)$$

2.2. تعيين عزم عطالة الجيروسكوب بالاعتماد على حركة المبادرة

بأخذ $\omega_R = 2\pi / t_R$ و $\omega_p = 2\pi / t_P$ وتعويضها في العلاقة (3) نحصل على علاقة بين مقلوب مدة دورة قرص الجيروسكوب t_R ومدة دورة المبادرة t_P:

$$\frac{1}{t_R} = \frac{m^* g r^*}{4\pi^2}\frac{1}{I_P}t_P \qquad (9)$$

وبحسب العلاقة 9 يبين الشكل4 العلاقة الخطية بين مقلوب مدة دورة قرص الجيروسكوب t_R ومدة دورة المبادرة t_P التي منها يمكن الحصول على عزم عطالة قرص الجيروسكوب.

إن مضاعفة قيمة العزم (مضاعفة الكتلة m^*) تؤدي إلى مضاعفة تواتر المبادرة. إذا كانت m^* معلقة إلى الحز الأمامي لمحور الجيروسكوب، أو إذا عكس اتجاه دوران القرص ينعكس أيضاً اتجاه دوران المبادرة.

إذا استخدم القرص الإضافي المطابق لقرص الجيروسكوب أيضاً وجُعِلَ القرصان يدوران في اتجاهين متعاكسين، فلن تحدث المبادرة لدى تطبيق عزم.

3.2. ترنح الجيروسكوب

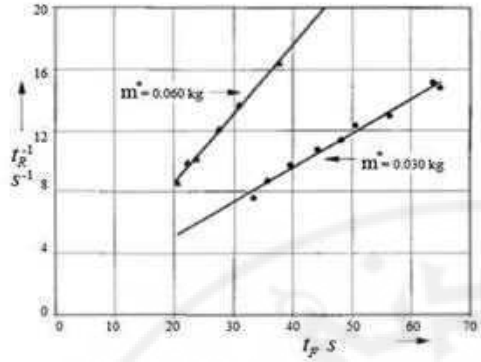
يمكن أن يختبر استقرار الجيروسكوب بالنقر على محور الدوران (تطبيق عزم لمدة زمنية قصيرة) وهو يدور حول محوره ويبادر لتظهر حركة ثالثة تدعى الترنح، وهي حركة دورية تظهر واضحة بارتفاع وانخفاض نهاية قضيب الجيروسكوب، وكأنها رجفان لا تلبث أن تختفي، وتتميز حركة الترنح بالتواتر الزاوي الخاص بها؛ يحسب بقياس دورها (المدة الزمنية الفاصلة بين ارتفاعين لنهاية القضيب). يمثل الشكل5 العلاقة بين التواتر الزاوي للترنح ω_N والسرعة الزاوية للقرص ω_R:

$$t_R = kt_N \quad ، \omega_N = k\omega_R \qquad (10)$$

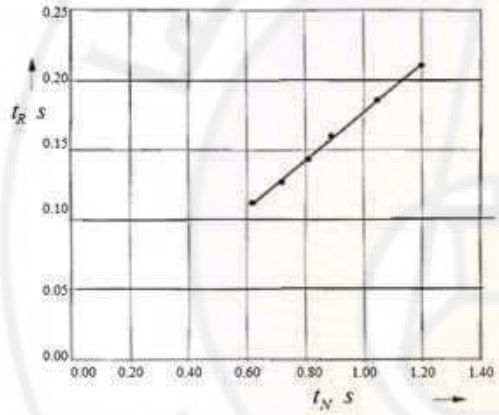
وأما الثابت k فيعتمد على مختلف عزوم العطالة بالنسبة إلى المحاور الرئيسية للدوران. ويلاحظ تأثره بالسرعة الزاوية البدائية.

3. الأجهزة والأدوات

جيروسكوب ثلاثي المحاور، حاجز ضوئي بعداد (انظر الملحق في نهاية التجربة)، منبع تغذيةVDC/0.3A5، قرص دوار إضافي يقابله كتلة موازنة، ساعة إيقاف



الشكل4. تعيين عزم العطالة من ميل الخط المستقيم $t_R^{-1} = f(t_P)$



الشكل5. دور الترنح t_N **بدلالة مدة دورة القرص** t_R

رقمية، قاعدة، مقمط، ماسك على شكل قضيب أسطواني، أثقال مشقوقة $10g$ (العدد5) (الشكل6)، جهاز حاسب مزود بنوافذ مناسبة وبرنامج القياسmeasure ووحدة Cobra، ساعة إيقاف رقمية، ومقياس للأطوال.

4. الإعدادات وطريقة العمل

1. تعيين عزم العطالة القطبي I_P لقرص الجيروسكوب بالطريقة المباشرة. ولتحقيق ذلك يتم تثبيت الجيروسكوب بحيث يكون



الشكل6. الجيروسكوب الثلاثي المحاور

محوره موجهاً أفقياً وموضوعاً على طاولة التجربة بحيث يقع مسقط أسطوانة الخيط على حافة المنضدة (الشكل3). يلف الخيط حول الأسطوانة، وتُربَط الكتلة المتسارعة $m = 60g$ (وهي عبارة عن صفيحة محملة بخمسة أوزان مشقوقة) بالطرف الحر من الخيط. يتم إجراء عدة تجارب من أجل عدة ارتفاعات سقوط h للكتلة المتسارعة، يسجل من أجلها زمن السقوط الوسطي t_F الموافق بدءاً من اللحظة التي يتحرر عندها الجيروسكوب إلى أن تمس الكتلة الأرض. ثم يرسم الخط البياني لمربع زمن السقوط t_F^2 بدلالة h، ويتم تعيين عزم عطالة قرص الجيروسكوب من ميل الخط المستقيم (المعادلة7).

الجدول1. تغيرات زمن السقوط ومربع زمن السقوط بدلالة الارتفاع

$h(m)$							
$t_f(s)$							
$t_f^2(s^2)$							

2. تعيين تواتر المبادرة: يوازن الجيروسكوب بتحريك الكتلة القابلة للانزلاق على القضيب حتى يصبح القضيب أفقياً، ثم يجري تدوير الجيروسكوب بسرعة زاوية عالية (يلاحظ انعدام محصلة القوى وعزومها)، وتقاس مدة دورة واحدة t_R (تواتر الدوران) عن طريق الحاجز الضوئي ذي الشعبتين، بحيث يكون محور الجيروسكوب أفقياً. بعد ذلك فوراً تعلق كتلة قدرها $m^* = 30g$ على بعد $r^* = 27cm$ في الحز عند الطرف الأطول لمحور الجيروسكوب، فتلاحظ حركة المبادرة. تقاس

مدة نصف دورة المبادرة $t_P/2$ بساعة إيقاف يدوية. ثم تزال الكتلة وينتظر حتى تتوقف حركة مبادرة الجيروسكوب، ويجري تحديد t_R من جديد. يتم إدخال القيمة الوسطية لقياسي مدة دوران القرص t_P. بالطريقة نفسها تسجل نقاط القياس الأخرى من أجل عدد متناقص من دورات الجيروسكوب. إن ميل الخط المستقيم يسمح لنا بحساب عزم عطالة قرص الجيروسكوب.

3. تمييز الترنح: إذا تم إعطاء ضربة خفيفة لمحور دوران الجيروسكوب من دون أن يخضع لأي قوة أخرى، يشرع الجيروسكوب في رسم حركة ترنح. تتحدد مدة دورة واحدة للترنح t_N بساعة إيقاف يدوية. يرسم دور الترنح بدلالة مدة دورة القرص ويتحدد عن طريق الحاجز الضوئي ذي الشعبتين.

الجدول2. تغيرات دور الدوران الرئيسي ودور المبادرة ودور الترنح

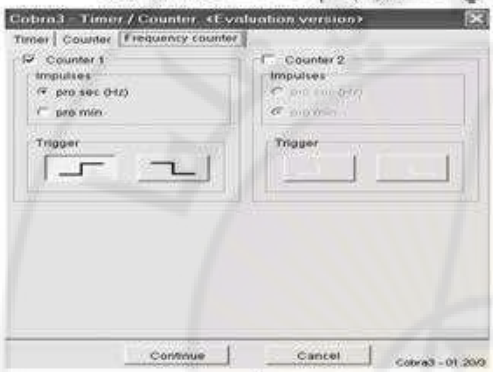
$t_R(s)$	$t_R(s)$	$1/t_R(s^{-1})$	$t_P(s)$	$t_N(s)$

ملحوظة مهمة:

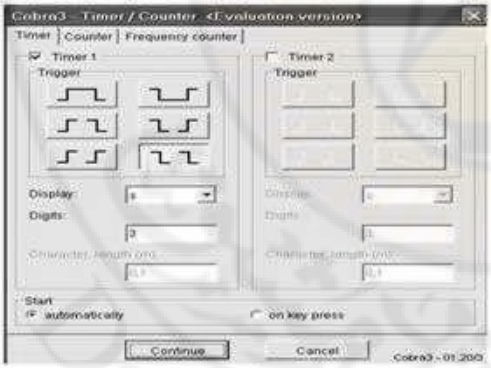
يمكن تعيين تواتر دوران قرص الجيروسكوب وتواتر دوران المبادرة بالاعتماد على الحاسوب وفقاً للخطوات التالية:

1. شغل برنامج measure، ثم اضغط أيقونة القياس الحمراء، أو اضغط علىfile، واختارnew measurement، ثم اضغط continue.

2. في مربع الحوار الذي يظهر لديك اختر frequency counter، وفعّل counter 1، وحدد التواتر مقاساً بالهرتز كما هو موضح في الشكل(7) ثم اضغط continue.



الشكل7. قياس التواتر



الشكل8. قياس الدور

3. قم بتدوير قرص الجيروسكوب بسحب الخيط (راقب كيف يحافظ على نفس الاتجاه)، ثم قم بوضع الحاجز الضوئي بحيث تمر فيه الورقة المثبتة على القرص، وقم بأخذ قيمة وسطية لعدة قراءات للتواتر.

4. بعد تسجيل قيمة التواتر قم بالضغط على stop لإنهاء القياس، وقم بالاحتفاظ بقيمة التواتر، ويمكن الحصول على قيمة وسطية للتواتر لأن البرنامج يسجل عدة قيم للتواتر كما يمكن الحصول على قيمة تواتر دوران القرص من المنحني التوافقي الناتج بعد إيقاف القياس.

ملحوظة: لا توقف حركة الجيروسكوب.

5. بهدوء قم بتعليق الكتلة 60g على البعد 27cm من نقطة تعليق الجيروسكوب وراقب حركة المبادرة.

6. لقياس تواتر المبادرة قم ببدء قياس جديد كما في السابق، ولكن هذه المرة اختر timer كما هو موضح في الشكل8 وعند مرور الورقة المعلقة على محور الجيروسكوب الرئيسي بالحاجز الضوئي (لاحظ كيف يقوم البرنامج ببدء القياس)، ثم قم بالضغط على القاطعة، ولاحظ كيف ينهي الحاسب القياس عند مرور الورقة نفسها ثانية في الحاجز الضوئي.

7. سجل هذه القيمة التي تعد قيمة دور المبادرة، ومنها يمكن حساب تواتر المبادرة.

انتبه: لدى قياس دور المبادرة يجب ألا تقوم بتحريك الحاجز الضوئي من مكانه (لماذا ؟؟).

5. تحليل النتائج التجريبية

1. ارسم المنحني البياني لمربع زمن السقوط بدلالة ارتفاع السقوط ومن ميله احسب عزم العطالة القطبي للجيروسكوب بالاعتماد على طريقة حركة دوران الجيروسكوب من العلاقة (7) مع تقدير الارتياب في القيمة المحسوبة.

2. بأخذ القيم الموافقة لنصف قطر القرص R وثخانته d والكتلة الحجمية للمادة البلاستيكية $\rho = 0.9 g/cm^3$ المصنوع منها قرص الجيروسكوب، احسب من العلاقة (8) عزم العطالة القطبي للجيروسكوب مع تقدير الارتياب في القيمة المحسوبة.

3. ارسم المنحني الذي يمثل مقلوب مدة دورة قرص الجيروسكوب t_R ومدة دورة المبادرة t_P ومن ميل الخط الناتج احسب عزم عطالة الجيروسكوب بالاعتماد على طريقة حركة المبادرة من العلاقة (9) مع تقدير الارتياب في القيمة المحسوبة، وقارن هذه القيمة مع القيمتين المحسوبتين من الطلبات السابقة.

4. ارسم العلاقة بين دور الترنح t_N بدلالة مدة دورة القرص t_R، واحسب من ميل الخط المستقيم احسب قيمة الثابت الوارد في العلاقة (10) مع تقدير الارتياب في حسابه.

5. ما واحدة قياس عزم العطالة في الجملة الدولية وفي الجملة السغثية؟ وما العلاقة بينهما؟

ملحق : الحاجز الضوئي ذو الشعبتين

1. وصفه والغرض منه

يستخدم الحاجز الضوئي ذو الشعبتين (الشكل9) للتحكم الإلكتروني في العدادات والساعات والتجهيزات الأخرى من خلال إشارته الكهربائية الواصلة القاطعة التي تعتمد

على مرور الضوء أو عدمه.

لا يصل إلى مستقبل الأشعة تحت الحمراء في الحاجز إلّا حزمة ضيقة جداً من الضوء، لوقوع المستقبل عميقاً في ثقب محفور في الحاجز لحمايته بشكل كامل من الضوء الخارجي. الأمر الذي يضمن تعتيم المستقبل بجسم قطره الفعال أقل من $d = 1.3mm$ في أي موقع من الحزمة. أو حتى بقطر قدره $d = 0.5mm$.



الشكل9. الحاجز الضوئي

إن الحاجز الضوئي ذا الشعبتين جاهز للاستخدام فور وصله بالكهرباء.

2. وظيفة العناصر وتشغيلها

1- مخرج TTL (مقبس $4mm$) للتحكم في التجهيزات المحيطية.

2- وصلة تأريض تؤدي دوراً مرجعياً للمخرج TTL 1 ووصلة منبع التغذية 3.

3- وصلة منبع التغذية (مقبس $4mm$). وهو الكمون $+5V$ بدقة 5% بالنسبة إلى وصلة التأريض

4- ثقب محفور مستقبل.

3. تداول الحاجز

1. جهاز تحكم خارجي

– صل مقبسي الوصل 1 و2 بمدخل بوابة أداة القياس. بدّل switch دخل بوابة القياس وفقاً للحاجات. إن كمونات خرج التحكم نحو $0V$ في حالة المستقبل المضاء ونحو $5V$ في حالة إطفاء المستقبل.

2. المنبع الكهربائي

تعتبر منابع الطاقة التالية $5V \pm 5\%$ التي تتميز بدقة مناسبة. منبع الطاقة $5V^{-}/0.3A$، منبع الطاقة $5V^{-}/1A$.

لا يحتاج الأمر لمنبع طاقة منفصل عندما يعمل الحاجز ذو الشعبتين مع أدوات العد التالية: أدوات قياس الزمن 13605.99، العداد الرقمي الإلكتروني بأربع مراتب عشرية 13600.93، عداد رقمي إلكتروني بتسع مراتب عشرية.

3. تجنب الأعطال

يجب ألّا يتجاوز طول الأسلاك الموصولة $3m$. يمكن أن تتأثر الأداة كثيراً بالشحنة الكهراكدية والظواهر الكهرطيسية الأخرى التي لم تعد تعمل ضمن المواصفات.

4. المواصفات

عرض الشعبة وعمقها $40mm$، الطول الموجي تحت الأحمر، تواتر العمل الأعظمي $> 25kHz$، زمن الإطفاء الأصغري $20\mu s$، المخرج يقاوم الدارة القصيرة لفترة مقتضبة.

المستقبل المضاء $> 3.6V$، انطفاء المستقبل نحو $0V$، **مقاومة الدخول** للتجهيزات الموصولة $> 10k$، **منبع التغذية** $+5V \pm 5\%$، $80mA$، الوقاية الاستقطابية مقتضبة، **المجال الحراري** $5...45^{\circ}C$. يتأمن في هذه الحالة $2V$ ككمون خرج للتحكم في التجهيزات المحيطية.

التجربة (6)

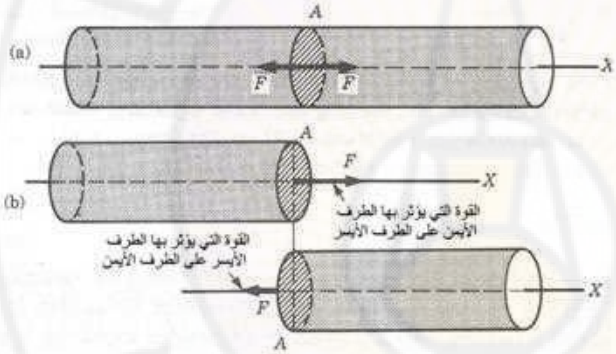
قياس معامل المرونة الطولاني (ثابت يانغ)

1. هدف التجربة

تعيين ثابت يانغ لسلك نحاسي، وآخر فولاذي بالطريقة السكونية.

2. المبدأ النظري

إذا أحدثنا اضطراباً في نهاية قضيب أو سلك صلب بضربه مثلاً بمطرقة ينتشر الاضطراب على طول القضيب، وربما يظهر بعد ذلك عند النهاية الأخرى. ونقول إن موجة مرنة Elastic Wave قد انتشرت على طول القضيب. ترتبط سرعة انتشار هذه الموجة المرنة بالخصائص الفيزيائية للقضيب.



الشكل1. القوتان المؤثرتان في كل مقطع من قضيب مشدود متساويتان ومتعاكستان

الإجهاد. لنأخذ قضيباً مقطعه A منتظم، تطبق عليه قوة وفق محوره ويشار إليها بالرمز F. ليس للقوة F بالضرورة القيمة نفسها في كل مقاطع القضيب بل يمكنها أن تختلف من مقطع إلى آخر. حيث يخضع كل مقطع عرضي في القضيب (كما يبين ذلك الشكل1) إلى قوتين متساويتين ومتعاكستين. إحداهما قوة شد يطبقها الجزء الأيمن من القضيب على الجزء الأيسر، والأخرى قوة شد يطبقها الجزء الأيسر من القضيب على الجزء الأيمن. يعرَّف الإجهاد الناظمي normal stress S على القضيب بأنه القوة المؤثرة في واحدة السطح من مقطعه عمودياً عليه (على المقطع) عند كل من جهتي المقطع، أي:

$$S = F/A \quad (N m^{-2}) \qquad (1)$$

الانفعال. يعاني كل مقطع من القضيب، بفعل هذه القوى، انتقالاً ξ موازياً للمحور. وإذا كان الانتقال هو نفسه في كل نقطة من القضيب فلا يحدث فيه أي تشوه، بل مجرد انسحاب

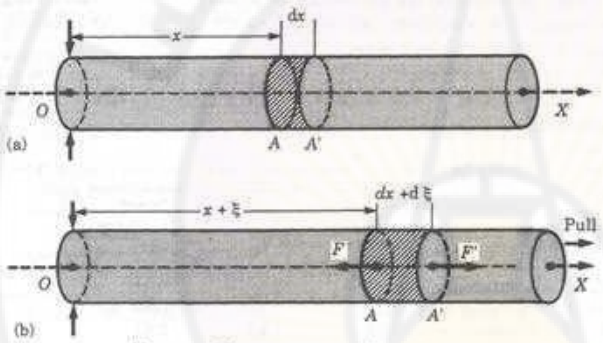
لمجمل القضيب وفق محوره. وفي حالة التشوه، يتغير ξ على طول القضيب أي إن ξ تابع لـ x. لنفترض مقطعين A و A' في القضيب تفصل بينهما مسافة dx قبل تطبيق الاضطراب (الشكل2). حين تطبق القوتان ينتقل المقطع A بالمقدار ξ والمقطع A' بالمقدار ξ'. ومِنْ ثَمَّ يكون البعد بين المقطعين A و A' في الحالة المشوهة: $dx+d\xi=dx+(\xi'-\xi)$، حيث $d\xi=(\xi'-\xi)$. إن تشوه القضيب في هذه المنطقة هو $d\xi$ للطول dx.

يعرف الانفعال الناظمي ε normal strain في القضيب بأنه التشوه الذي يطرأ عليه وفق محوره من أجل واحدة الطول. وبما أن التشوه $d\xi$ يحدث للطول dx فإنه يمكن التعبير عن الانفعال الناظمي في القضيب بالعلاقة:

$$\varepsilon=\frac{d\xi}{dx} \qquad (2)$$

قد يكون التشوه عاماً ومائلاً فيكتب الانفعال عندئذ على الشكل:

$$\varepsilon=\frac{\partial\xi}{\partial x} \qquad (2')$$



الشكل2. (a) القضيب قبل مرور موجة المرونة (b) القضيب أثناء مرور موجة المرونة

لنلحظ أنه إذا لم يوجد تشوه يكون ξ ثابتاً و $\varepsilon=0$، أي إنه لا يوجد أي انفعال ناظمي. وبما أن الانفعال الناظمي هو نسبة طولين فهو عدد لا أبعاد له.

قانون هوك:

يربط قانون هوك Hooke Law بين الإجهاد الناظمي S والانفعال الناظمي ε للقضيب، وينص على أن **الإجهاد الناظمي يتناسب طردياً مع الانفعال الناظمي**، وهي حالة خاصة من قانون هوك العام:

$$S=Y\varepsilon \qquad (3)$$

يدعى ثابت التناسب Y **معامل يانغ** *Young modulus* أو **عامل المرونة الطولاني** ويقدر بـ $N\,m^{-2}$؛ لأن الانفعال الناظمي ε مقدار ليس له أبعاد. يعدّ قانون هوك تقريباً جيداً للسلوكية

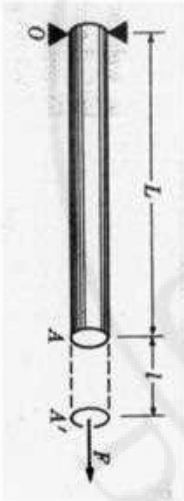
المرنة للمادة طالما أن التشوهات صغيرة. أما في حالة الإجهادات والتشوهات الشديدة فلا تبقى المعادلة (3) صالحة، ويغدو وصف الحالة الفيزيائية أكثر تعقيداً.

يعطي الجدول1 ثوابت المرونة لبعض المواد وهي معامل يانغ Y ومعامل الانضغاط (المرونة الحجمية) κ، ومعامل القص G (أو معامل المرونة العرضاني) الذي يعرف بمعادلة مماثلة لمعادلة معامل يانغ، وتختلف هذه القيم باختلاف نقاوة مادة السلك اختلافاً محسوساً. بإدخال المعادلتين (1) و (2) في المعادلة (3) وبإجراء الحل من أجل F نحصل على:

الجدول 1. ثوابت المرونة لبعض المواد $(10^{11} N m^{-2})$

المادة	Y	κ	G
الألمنيوم	0.70	0.70	0.25
النحاس	1.10	1.40	0.42
الفولاذ	2.00	0.60	0.84
التنغستن	3.50	2.00	1.40
النيكل	2.1	1.64	0.72
الشَّبَه	0.91	0.27	0.26

$$F = YA\frac{\partial \xi}{\partial x} \qquad (4)$$



الشكل3

في حالة قضيب أو سلك متوازن إحدى نهايتيه مثبتة في نقطة O (الشكل3) وتخضع النهاية الأخرى A إلى قوة F، ينبغي أن يكون للقوة القيمة نفسها عند كل مقطع من السلك وتساوي F. يمكننا عندئذ إجراء تكامل المعادلة (4) حيث F ثابتة، للحصول على التشوه عند كل مقطع.

$$\int_0^{\xi} d\xi = \frac{F}{YA}\int_0^{x} dx \qquad \text{أو} \qquad \xi = \frac{F}{YA}x$$

وبصورة خاصة نحصل على التشوه الذي يمثل الاستطالة l عند النهاية الحرة A في هذه الحالة بجعل $x = L$ بحيث إن:

$$l = \frac{FL}{YA} \qquad \text{أو} \qquad Y = \frac{F/A}{l/L} = \frac{FL}{lA} \qquad (5)$$

تعطي هذه العلاقة قاعدة القياس التجريبي لمعامل يانغ.

سرعة انتشار موجة المرونة

إذا كان القضيب غير متوازن فلا تكون القوة نفسها على طول القضيب، وعليه فإن مقطعاً من القضيب سمكه dx سوف يخضع إلى قوة كلية أو محصلة. يخضع الوجه A' للشريحة ذات السمك dx على سبيل المثال في الشكل2، إلى القوة F' نحو اليمين ناجمة عن شد الجزء

الأيمن من القضيب، بينما يخضع الوجه A إلى القوة F تتجه نحو اليسار ناجمة عن شد الجزء الأيسر من القضيب والقوة المحصلة على المقطع نحو اليمين تكون $F'-F=dF=(\partial F/\partial x)dx$ وإذا كانت ρ الكتلة الحجمية لمادة القضيب فإن كتلة الشريحة هي:

$dm=\rho\,dV=\rho\,A\,\mathrm{dx}$، حيث $A\,\mathrm{dx}$ حجم الشريحة. إن تسارع هذه الكتلة هو $\dfrac{\partial^2\xi}{\partial t^2}$ ومِنْ ثَمَّ بتطبيق علاقة التحريك: القوة = الكتلة × التسارع، يمكن كتابة معادلة حركة الشريحة بالشكل:

$$\frac{\partial \mathrm{F}}{\partial \mathrm{x}}dx=(\rho\,A\,dx)\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} \qquad (6)$$

أو

$$\frac{\partial F}{\partial x}=\rho\,A\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}$$

لدينا في هذه المسألة حقلان أحدهما هو **الانتقال** ξ لكل مقطع من القضيب، حيث ξ تابع للموضع وللزمن، والآخر هو **القوة** F على كل مقطع، حيث F هو كذلك تابع للموضع وللزمن. والحقلان مرتبطان بالمعادلتين (4) و (6) اللتين يمكن تسميتهما المعادلتين التفاضليتين **للحقل المرن** لقضيب مشوه هما تصفان الشروط الفيزيائية للمسألة. إنهما **المكافئ الرياضي لمعادلات ماكسويل للحقل الكهرطيسي**. باشتقاق المعادلة (4) بالنسبة لـ x، وتعويض النتيجة في (6) نحصل على:

$$\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}=\frac{Y}{\rho}\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2} \qquad (7)$$

تدل هذه المعادلة على أن حقل التشوه ξ ينتشر على طول القضيب بالسرعة:

$$\mathrm{v}=\sqrt{Y/\rho} \qquad (8)$$

تتأكد هذه النتيجة تجريبياً بقياس كل من الكميات الثلاث بشكل مستقل. يمكننا أن نلحظ أن المعادلة (8) متجانسة الأبعاد؛ لأن Y يقدر بـ $N\,m^{-2}$ و ρ بـ $kg\,m^{-3}$، ومِنْ ثَمَّ تساوي نسبة وحدتيهما مربع سرعة. يمكن للقارئ، انطلاقاً من المعادلة(4)، أن يتحقق من أن حقل القوة F يحقق معادلة مماثلة:

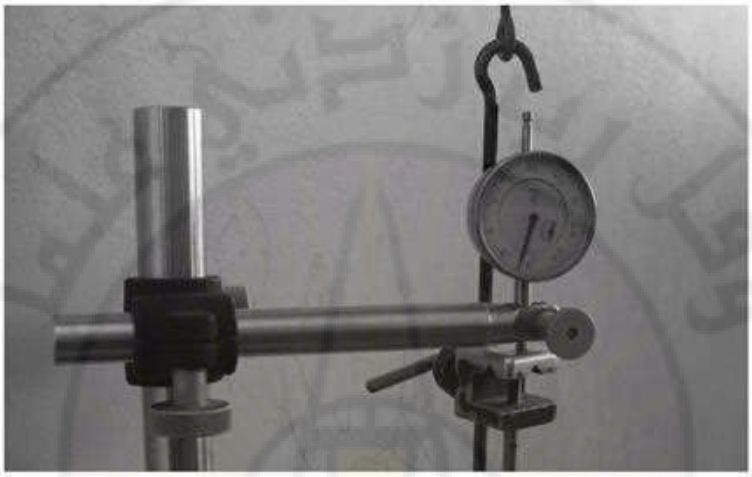
$$\frac{\partial^2 F}{\partial t^2}=\frac{Y}{\rho}\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \qquad (9)$$

مما يدل على أن حقل القوة ينتشر على طول القضيب بسرعة حقل التشوه نفسه.

تقبل المعادلتان (7) و (9) حلولاً موجية، جيبية مثلاً، تقابل تغيرات لكميات فيزيائية، كالتشوه ξ والقوة F، تسير على طول اتجاه انتشار الموجة، أي على طول المحور x. يدعى هذا النوع من الحركة الموجية **أمواجاً طولية**.

ينبغي أن نلحظ أن معادلتي الحقل (4) و (6) تؤديان إلى معادلتي الموجة (7) و (9)، ولكن العكس غير صحيح؛ لأنه يمكن لمعادلات حقل أخرى أن تؤدي إلى معادلة موجة، وعلى هذا فإن المعادلتين (7) و (9) ليستا إلّا نتيجة لمعادلتي الحقل.

3. الأدوات والأجهزة



الشكل4

سلكان معدنيان طويلان معلقان ومثبتان من أحد الطرفين وينتهي طرفاهما الآخران بقطعة معدنية منتهية بمخلب تعليق، قضيب ينتهي بثقل مثبت فيه، يمكن إضافة أثقال فوقه بصورة متتالية. ممسك قابل للإزاحة أيضاً وفيه على أحد وجوهه فرضة تستخدم لتحديد القراءة الأولى، مقياس يشبه الدوّارة اللولبية (يختلف عنها بوجود دائرة صغيرة ذات مؤشر، تعد الدورات التي يقوم بها المؤشر الكبير بقياس أجزاء بالمئة من الملمتر مقابل كل تدريجة صغيرة (الشكل4)، كما أن الساعد الذي يقيس الانزياح محكوم بنابض)، دوارة لولبية، مقياس للأطوال.

4. طريقة العمل

1. علّق القضيب ذا الكفة بأحد السلكين، ثم ضع في الكفة أثقالاً كافية لجعل السلك مستقيماً وشاقولياً تماماً، وعدل وضع المقياس المشابه للدوّارة اللولبية بحيث تكون قراءة المؤشر الصغير في الوسط (وهو يؤدي دور المسطرة). سجل القراءة، ثم ضع بعد ذلك في كفة السلك الذي تجري عليه التجربة مجموعة الأثقال التي يراد استعمالها بالتتالي. امسك بإحدى يديك الكفة كلما أضفت إليها ثقلاً لتمنع عن السلك ازدياد الشد المفاجئ، وبعد أن يستقر أول ثقل أضفته

إلى الكفة، سجل القراءة واحسب الاستطالة، ثم انزع الثقل عنها من جديد بالحيطة نفسها التي اتخذتها في أثناء الإضافة، وخذ القراءة مجدداً بعد استقرار الكفة. فإذا كان السلك سوياً لا عوج فيه أو تثن، كانت القراءة الجديدة والقراءة الابتدائية نفسها قبل الشروع بالإضافة، أما إذا لم تكن نفسها فذلك يعني أن السلك لم يكن سوياً سليماً، وقد ساعد الثقل المضاف على تسويته. وقد لا تتم تسوية السلك إلّا بعد إضافة عدة أثقال وعليك التحقق من ذلك.

2. كرر العمل نفسه بإضافة أثقال أخرى، وسجل قراءات المؤشر وما يقابلها من الأثقال المحملة على الكفة، ثم أعد العمليات نفسها عند نزع الأحمال وسجل النتائج في جدول كالتالي:

الحمولة الإضافية	حمولة الكفة	قراءة الفرنية		الاستطالة الناجمة عن إضافة كتلة $(2kg)$ فكتلة (مثلاً)
		أثناء التحميل	أثناء النزع	

3. استخدم القيمة الوسطية للعمود الأخير في حساب ثابت يانغ Y من العلاقة (3). حيث تساوي F في تلك العلاقة ثقل كتلتين (بافتراض أن الكتل الإضافية كلها متساوية. تأكد من ذلك). أما مقطع السلك فيحسب من قياس قطره في عدة مواضع مختلفة منه بمكرومتر (دوارة لولبية)، استعمل في الحساب القيمة الوسطية لهذه القياسات. كرر المراحل من 1 إلى 3 من أجل السلك الآخر .

4. احسب الارتياب الأعظمي في حساب Y بمفاضلة العلاقة (5) لغارتمياً للسلكين كليهما.

5. احسب سرعة انتشار الأمواج المرنة الطولية في قضيب الفولاذ، إذا علمت بأن الكتلة الحجمية للفولاذ $7.8\times10^{3}kg\,m^{-3}$، ثم احسب الارتياب المرتكب في تعيينها. كرر الحساب من أجل النحاس.

ملاحظة

ليس من الضروري أن تكون قيمة ثابت يانغ مساوية تماماً لما يرد في جدول ما للثوابت؛ لأن هذا الثابت (وغيره من ثوابت المرونة) يتغير تغيراً واضحاً من سلك لآخر وإن كان تركيبهما واحداً، وذلك لأن خواص المرونة لا تتعلق فقط بتركيب المادة، وإنما أيضاً بما يمر عليها من معالجات حرارية وميكانيكية. حتى إن نتائج القياس على السلك الواحد قد تتغير بعد القيام بعدد كبير من التجارب، ولاسيما إذا قاربت الأثقال المحمّلة بعض الأحيان حد مرونة السلك.

التجربة (7)

ميزان الفتل ونواس الفتــل

1. هدف التجربة

قياس ثابت الفتل لسلك معدني وثابت الصلابة لمادته (أو ثابت المرونة العرضاني أو معامل القص).

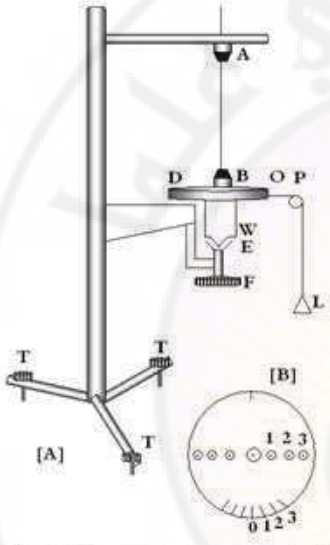
2. المبدأ النظري

ثابت الفتل (ميزان الفتل)

إذا ثبت سلك من أحد طرفيه A (الشكل1) وأثرت مزدوجة أو عزم قوة خارجية في طرفه الآخر B (بحيث يكون متجه العزم محمولاً على محوره، أي أن تكون القوة عمودية على ذلك المحور) فإن السلك يفتل، ثم يتوازن بعد أن يفتل طرفه B زاوية مقدارها θ راديانا تتناسب طردياً مع العزم المطبق Γ:

$$\Gamma = C\,\theta \qquad (1)$$

حيث C ثابت فتل السلك *torsion constant*. ومن جهة أخرى، يمكن ربط ثابت فتل السلك بأحد عوامل مرونة مادته الذي يكون مستقلا عن طول السلك أو عن مساحة مقطعه، فنستخدم الإجهاد مؤثراً خارجياً (وهو القوة المطبقة على واحدة السطح) والانفعال (التغير الحاصل لواحدة الطول). في الحقيقة، عندما تدرس عوامل المرونة في جسم يؤخذ مكعب طول ضلعه يساوي وحدة الطول قبل الإجهاد، ثم تحدد القوى المطبقة على وجوهه الست التي يعبّر عنها مجتمعة بما يسمى تنسور (ممتد) الإجهاد وله ست



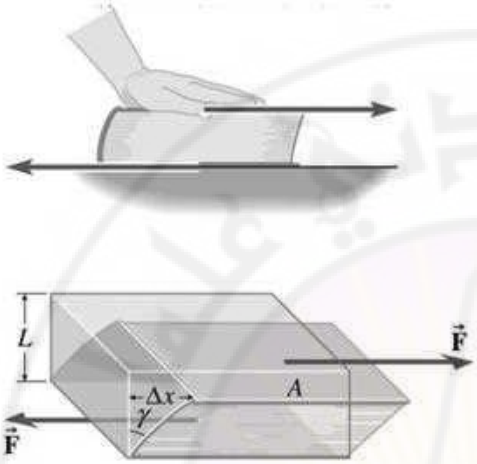


الشكل1

مركبات مستقلة عندما تؤخذ شروط التوازن في الحسبان، ثلاث منها ضغطية أو شدّية (أي إن القوى عمودية على السطح التي تؤثر فيه) وثلاث على شكل مزدوجات (أي إن القوى موازية للسطح الذي تؤثر فيه) يظهر في الشكل2، لدى تحليل القوى على الوجهين العلوي والسفلي فقط. أما الانفعال فيمثل أيضا بتنسور الانفعال. وإذا ما كنا ضمن تقريب قانون هوك المعمم القاضي بتناسب الانفعال مع الإجهاد نحصل على تنسور عوامل المرونة من الدرجة الرابعة؛ لأن كلاً من تنسور الإجهاد والانفعال تنسور من الدرجة الثانية. يختصر عدد مركبات تنسور عوامل المرونة عند افتراض التجانس والتناحي إلى مركبتين فقط، غالبا ما يستخدم عامل طولاني هو ثابت يانغ Y وآخر عرضاني هو عامل الصلابة G. وقد يستخدم ثابت يانغ ونسبة بواسّون σ التي تعرف بأنها نسبة الانفعال العرضاني إلى الانفعال الطولاني، وهي تعطى بدلالة معامل يانغ ومعامل الصلابة بالعلاقة:

$$\sigma = (Y - 2G)/2G \approx \tfrac{1}{3}$$

قياساً على ذلك يمكن القول أن زاوية الفتل θ تتناسب طردياً مع طول السلك $\overline{AB} = l$ وعكسياً مع سطح مقطعه A ومِنْ ثَمَّ فهي تساوي:



الشكل2. إجهاد القص يجعل الوجه العلوي للكتاب يتحرك إلى اليمين بالنسبة للوجه السفلي

$$\theta = \Gamma \frac{2l}{\pi G r^4} = \Gamma \frac{2\pi l}{G A^2} \quad (2)$$

حيث G عامل الجساءة أو القص (أو ثابت المرونة أو الصلابة العرضاني) و r نصف قطر السلك. وتكون العلاقة التي تربط بين ثابت الفتل وعامل القص هي:

$$C = \frac{\pi r^4}{2l} G = \frac{\pi d^4}{32l} G \quad (3)$$

وقد تم إدخال قطر السلك $d = 2r$ لأنه يشكل المقدار الذي يقاس مباشرةً.

يمكن بقياس كل من زوايا الفتل θ والعزوم Γ المسببة لها حساب ثابت الفتل C، ومن ثم يمكن بالاعتماد على ثابت الفتل C وقياس كل من طول السلك l وقطره d حساب عامل القص G.

لقد استخدم العالم كافنديش مثل هذا السلك بعد أن علّق في نهايته السفلية قضيباً ذا كرتين ومرآةً عليه لقياس زاوية الفتل بدقة عالية. فعند تقريب كرتين أخريين منهما كبيرتين ينفتل السلك بتأثير قوى التجاذب المتبادلة التي شكّلت مزدوجة، فحدّد ثابت الجاذبية العالمي في التجاذب الثقالي. ويروى عنه أنه قال بغية إيجاد تمويل لتجربته أنه سيزن الأرض. ويسمى هذا الترتيب ميزان الفتل الثقالي (التجربة السابعة عشرة من هذا الكتاب) فهو يستخدم الحالة التوازنية. أما إذا استخدمت الحالة الحركية الاهتزازية فيسمى نواس الفتل الثقالي.

اهتزازات (نوّاس) الفتل *Torsional (pendulum) Oscillations*

تعدّ اهتزازات الفتل الشّبَه الدوراني للاهتزازات الانسحابية لكتلة معلّقة بنابض، فيأخذ عزم العطالة مكان الكتلة وعزم الإرجاع مكان قوّة إرجاع النابض $(-kx)$.

يمكن القول إنّ نشوء عزم الإرجاع *Restoring torque* هو دليل على وجود طاقة كامنة في جسم مفتول. وبتقريب أولي يتناسب عزم الإرجاع M طردياً مع الإزاحة الزاوية بين طرفي الجسم أو السلك فيمكن أن نكتب:

$$M = -C\theta \qquad (4)$$

حيث C ثابت فتل السلك ومِنْ ثَمَّ تعطى الطاقة الكامنة المختزنة على النحو:

$$U = -\int M d\theta = \frac{1}{2} C\theta^2 \qquad (5)$$

فإذا طرأ انحراف زاوي θ على جسم عزم عطالته I ومعلق إلى إحدى نهايتي جملة مفتولة (وإذا كان عزم عطالة السلك المفتول مهملاً) يكون لنظرية انحفاظ الطاقة الشكل:

$$\frac{1}{2} I \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 + \frac{1}{2} C\theta^2 = E \qquad (6)$$

$$\omega^2 = C/I \quad \text{ومن ثم} \qquad (7)$$

$$T = 2\pi\sqrt{I/C} \qquad (8)$$

تقابل العلاقة (6) في حالة الحركة الاهتزازية لجسم كتلته M معلق بنابض ثابته k، العلاقة $(\frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = E)$، وهي تشبه أيضاً حالة انتشار الأمواج الطولية أو العرضية في سلك مشدود. ومِنْ ثَمَّ فإنّ قياس الدور يعطي ثابت فتل السلك إذا ما عرف عزم عطالة الجسم.

لمعامل القص G ومعامل يانغ Y (معامل الصلابة الطولاني) الذي درسناه في التجربة السادسة المرتبة نفسها ولو أن معامل القص أخفض بكثير من معامل يانغ. (راجع جدول عوامل المرونة في التجربة السادسة).

3. الأدوات والأجهزة

عداد ثوان، صنجتان أسطوانيتان متماثلتان، ميزان الفتل. يتألف ميزان الفتل (الشكل 1) من سلك معدني أسطواني طويل AB يمكن تثبيته تثبيتاً متيناً عند نقطتين منه بكلابتين عند طرفيه A وB. أما الكلابة B فهي مثبتة بقرص D وبكتلة أسطوانية ثقيلة W تفيد في جعل السلك مشدوداً، وينتهي الطرف السفلي لهذه الكتلة بنتوء مخروطي E يقع داخل تجويف مخروطي يمكن بوساطة اللولب F رفعه إلى الأعلى حتى تستند إليه الكتلة الأسطوانية فيمتنع حينئذٍ دوران جملة الكتلة والقرص والكلابة B. أما القرص D فإطاره مزود بشق يثبت فيه أحد طرفي خيط يمكن لفه على إطار القرص وفق مجرى على محيطه، وينتهي الطرف الآخر للخيط بكفة ميزان L بعد مروره على بكرة خفيفة P. ويقع تجاه إطار القرص لوح بلاستيكي O رسم عليه خط رأسي أسود | يستخدم لتحديد الزاوية التي يدورها القرص (أي التي يفتل بها السلك)، عندما تحمّل الكفة بوزن ما. وقد درج إطار القرص بعشرات الدرجات بدءاً من الصفر، وقد تم لصق شريط من ورق مليمتري على مجال تدريج القرص الذي يمتد من الرقم 0 إلى الرقم 1، تساعد تدريجاته على قراءة آحاد الدرجة وأجزائها.

يضم سطح القرص ست تجاويف دائرية وفق أحد أقطاره (الشكل 1B) متناظرة بالنسبة لمركز القرص. تستخدم هذه التجاويف كقواعد لصنجات أسطوانية متماثلة حجماً ووزناً. علماً أن نصف قطر القرص $(R = 17cm)$، وكتلة الصنجة الواحدة $(M = 175g)$، أبعاد مراكز القواعد الدائرية المتناظرة عن مركز القرص على التوالي: $(d = 4, 8, 12cm)$. على الطالب أن يتحقق من صحة هذه المعلومات.

4. طريقة العمل

(a) الطريقة السكونية (ميزان الفتل)

1. حرر الكتلة الأسطوانية C من مسندها واستخدم اللولب (الشكل 1A) لمنع النتوء المخروطي E من الاحتكاك بالتجويف المخروطي في أثناء فتل السلك ودوران القرص D.

2. أدر الكلابة A باليد حتى يظهر محور السلك على استقامة واحدة مع الخط الرأسي وتدريج الصفر حين ينظر إليه بإحدى العينين.

3. يلف الخيط المرتبط بالكفة حول القرص، ثم تحمّل الكفة بوزن صغير ($3g$ مثلاً) وتقاس الزاوية θ التي يدورها القرص نتيجة لفتل السلك، يكرر العمل نفسه من أجل وزن آخر ($6g$ ثم $10g$ مثلاً) وتقاس زاوية الدوران في كل حالة.

4. يعبر عن عزم القوى التي قامت بفتل السلك بالعلاقة: $\Gamma = mgR$، حيث R نصف قطر القرص. ارسم عزم القوى Γ مقدراً بالوحدة gR (أي الكتلة m) بدلالة زوايا الدوران θ مقدرة بالوحدة $\pi/180^\circ$ (أي بقيمة الدرجة) في التجارب التي أجريتها ثم احسب ميل الخط البياني $\Delta m/\Delta\theta^\circ$ واستنتج منه ثابت فتل السلك على النحو:

ثم $C = \dfrac{\Delta\Gamma}{\Delta\theta(rad)} = \dfrac{\Delta m}{\Delta\theta^\circ}\dfrac{gR}{\pi(rad)/180^\circ}$

استنتج ثابت الصلابة (عامل القص) G لمادة السلك اعتماداً على العلاقتين (1) و(2) بعد قياس طول السلك l وقطره $2r$، واحسب بعدئذٍ الارتياب المطلق المرتكب في قياس كل من C و G.

(b) الطريقة الاهتزازية الدينميكية (نواس الفتل)

1. انزع من ميزان الفتل الكفة وخيطها وضع صنجتين على القاعدتين المتناظرتين (رقم 1 مثلاً في الشكل1B) تحقق من أن الخط الرأسي | يقع على استقامة واحدة مع تدريج الصفر ومحور السلك، فيكون كل من الصنجتين على بعد d_1 من المركز.

2. أدر القرص باليد زاوية مناسبة بحيث لا ينزاح السلك عن وضعه الشاقولي، ثم دع الجملة لتهتز تحت تأثير قوى المرونة. استعمل عداد الثواني لقياس الزمن t الموافق لأكبر عدد ممكن n من الاهتزازات الكاملة. احسب زمن الاهتزازة الواحدة $T_1 = t/n$.

3. إن ثابت الفتل C يعطى وفقاً للعلاقة (8) بما يلي:

$$C = 4\pi^2 I/T^2 \qquad (15)$$

حيث: I عزم عطالة الجملة المتحركة كلها (القرص D والكتلة w والصنجتين). فإذا أهملنا التصحيح الناجم عن تحرك كتلة السلك لضآلتها بالنسبة للكتل الأخرى وأهملنا عزم عطالته للسبب نفسه، فإن $I = I_0 + I_1$ حيث I_0: مجموع عزم عطالة القرص D وعزم عطالة الكتلة w وحيث I_1: مجموع عزمي عطالة الصنجتين. وللتخلص من حساب I_0 ضع الصنجتين على القاعدتين المتناظرتين (الموضع رقم 2 مثلاً في الشكل 1، فيكون بعد كل منهما عن المركز d_2) وكرر العمل بالفقرة (2)، واحسب دور الاهتزازة T_2 حيث يمثل I_2: مجموع عزمي الصنجتين في هذه الحالة

فيكون لدينا وفقاً للعلاقة (8):

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I_0 + I_1}{C}} \quad \text{و} \quad T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{I_0 + I_2}{C}}$$

$$\text{أي: } C = \frac{4\pi^2}{T_2^2 - T_1^2}(I_2 - I_1)$$

$$\text{حيث: } I_1 = 2Md_1^2 \quad \text{و} \quad I_2 = 2Md_2^2$$

$$\text{أي: } I_2 - I_1 = 2M(d_2^2 - d_1^2)$$

$$\text{إذاً: } C = \frac{8\pi^2}{T_2^2 - T_1^2} M(d_2^2 - d_1^2) \quad (16)$$

4. احسب قيمة C من العلاقة السابقة (16) بعد قياس الدورين T_1 و T_2 والبعدين d_1 و d_2 ومعرفة كتلة الصنجة المستعملة، وقارنها بالقيمة التي وجدتها في القسم الأول بعد تقدير الارتياب المطلق المرتكب في هذا الحساب.

5. قارن بين ثابت فتل السلك في تجربتك وعزم إرجاع النابض في تجربة عزوم العطالة من حيث الطبيعة والوحدة، وهل يتغيران بتغير طول السلك أو النابض؟ ثم قارن بين ثابت الصلابة في تجربتك وعامل يانغ في تجربة زملائك من حيث الطبيعة والوحدة، وهل يتغيران بتغير أبعاد الأسلاك؟

تمرينات إضافية

1. قارن بين وحدة ثابت فتل السلك في تجربتك ووحدة ثابت إرجاع النابض الحلزوني التي حصل عليها زملاؤك الذي يعملون على تجربة عزوم العطالة؟ ما التسمية الأخرى التي تقترحها لثابت فتل السلك؟

2. قارن وحدة معامل القص ومرتبة القيمة التي حصلت عليها بما حصل عليه زملاؤك العاملون على تجربة عامل يانغ.

3. هل تتناول هذه التجربة دراسة الاهتزازات أم الأمواج أم كليهما معاً ؟ وضح إجابتك بالتفصيل وباللجوء إلى المعادلات الرياضية.

التجربة (8)

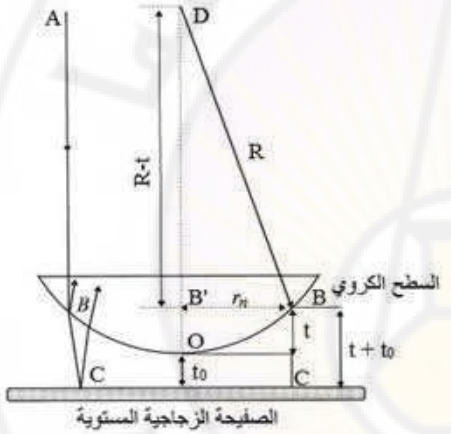
حلقات نيوتن

1. هدف التجربة

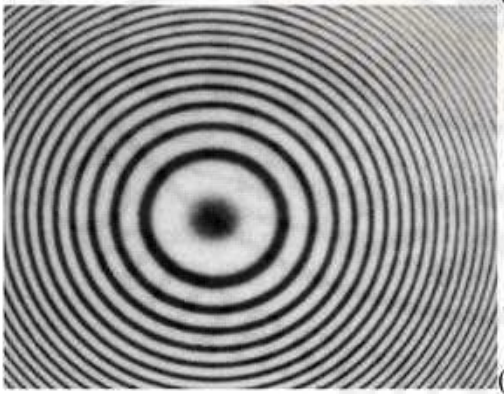
دراسة أهداب تساوي السمك وقياس انحناء الوجه الكروي **لعدسة**.

2. المبدأ النظري

لنتأمل الطبقة الهوائية المحصورة بين لوح زجاجي مستوٍ والوجه المحدب لعدسة مستوية محدبة على تماس مع اللوح الزجاجي في النقطة O، (الشكل 1a).



(a)



(b)

الشكل 1

فإذا سقط شعاع وحيد اللون AB ناظمياً على السطح المستوي للعدسة، فإن قسماً من هذا الشعاع ينعكس عن سطح العدسة المحدب عند B ويتابع القسم الآخر طريقه في الطبقة الهوائية حتى ينعكس عن سطح اللوح الزجاجي عند C، ويقترن انعكاسه هذا بتغير في الطور قدره π أي فرق في المسير δ قدره $\lambda/2$ ويكون فرق المسير الضوئي بين الشعاعين المنعكسين عند B و C مساوياً:

$$\delta = 2t + \lambda/2 \qquad (1)$$

حيث يدل t على سمك الطبقة الهوائية CB. فإذا كان: $\delta = n\lambda$ حيث n أي عدد صحيح، أي:

$$2t = (2n-1)\frac{\lambda}{2} \qquad (2)$$

كان موقع C مركزاً لهدب مضيء. أما إذا كان: $\delta = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$ أي:

$$2t = n\lambda \qquad (3)$$

فإن موقع C يكون مركزاً لهدب مظلم.

لنتأمل مستوياً عمودياً على مستوي الورقة وماراً من O و C، فنرى أن محيط الدائرة ذات المركز O ونصف القطر OC يمر من جميع النقاط التي يكون عندها سمك طبقة الهواء بين السطح المستوي وسطح العدسة المحدب واحداً، أي إن كل الأشعة الناظمية التي ترد على نقاط هذا المحيط تعاني من فرق المسير نفسه المعطى بالعلاقة (1)، لذا تتكون أهداب التداخل حول المركز O على شكل حلقات مضيئة ومظلمة متناوبة (الشكل1b)، ويكون المركز O نفسه مظلماً؛ لأن سمك طبقة الهواء الفاصلة بين سطحي العدسة واللوح الزجاجي عند تلك النقطة صغير جداً ويحقق العلاقة (3) عند $n=0$. وإذا لم يكن المركز O مظلماً فذلك يرجع إلى وجود بعض جسيمات من الغبار تجعل البعد بين السطحين لا يحقق العلاقة (3).

ليكن r_n نصف قطر الحلقة المظلمة التي ترتيبها n بدءاً من المركز الذي ترتيبه صفر. ولنفترض أن هذه الحلقة تقع عند C في الشكل1a فيكون لدينا:

$$BB'^2 = OB' \times B'D \quad \text{أو} \quad r_n^2 = t(2R - t)$$

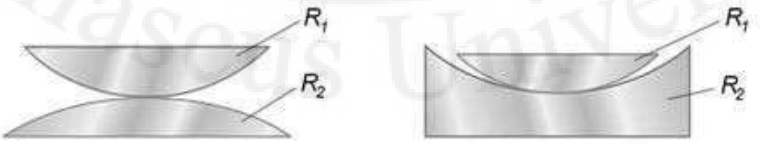
حيث يدل R على نصف قطر انحناء وجه العدسة المحدب. ولما كان السمك t صغيراً جداً بالنسبة إلى نصف القطر R، أمكننا أن نكتب:

$$r_n^2 = 2Rt \quad \text{أو} \quad t = \frac{r_n^2}{2R}$$

نعوض قيمة t هذه في العلاقة (3) فنجد: $r_n^2 = nR\lambda$، أو:

$$r_n = \sqrt{nR\lambda} \quad \text{الحلقات المظلمة} \qquad (4)$$

فالحلقة المظلمة المركزية توافق $n=0$، والأولى $n=1$، وهكذا ... أي إن أنصاف أقطار الحلقات المظلمة تتناسب مع الجذور التربيعية لسلسلة الأعداد الصحيحة، ولذا يزداد تراصها كلما ابتعدت عن المركز.



الشكل2

وباتباع الطريقة السابقة والانطلاق من العلاقة (2) العائدة للحلقات المضيئة، يمكن أن نثبت أن أنصاف أقطارها تعطى بالعلاقة:

$$r_n = \sqrt{\left(n+\frac{1}{2}\right)R\lambda} \quad \text{الحلقات المضيئة} \qquad (5)$$

هذا ويمكن الحصول على حلقات نيوتن باستخدام عدستين متلاصقتين، كما هو مبين في الشكل2 (a وb). ويمكن البرهان حينئذٍ على أن أنصاف أقطار الحلقات المظلمة r_n تعطى بالعلاقة:

$$r_n = \sqrt{n\lambda\frac{R_1R_2}{R_2 \pm R_1}} \quad \text{أو} \quad r_n^2 = n\lambda\frac{R_1R_2}{R_2 \pm R_1}$$

وهذه العلاقة تؤول إلى العلاقة (4) عندما $R_2 = \infty$.

وتؤخذ الإشارة الموجبة في حالة الشكل2a والإشارة السالبة في حالة الشكل2b، ويمكن استخدام أي من العلاقتين (4) و(5) لقياس طول موجة الضوء المستعمل أو لقياس نصف قطر انحناء وجه العدسة الكروي، إلاّ أن التماس بين العدسة واللوح لا يكون عادةً محققاً بسبب ما يفصل بينهما من ذرات الغبار الدقيقة، لذلك يفضل استعمال العلاقة التالية التي تصح في حالة الحلقات المضيئة أو الحلقات المظلمة على السواء:

$$d_{n'}^2 - d_n^2 = 4(n'-n)R\lambda \qquad (6)$$

حيث d_n: قطر الحلقة التي رقمها n و $d_{n'}$: قطر الحلقة التي رقمها n' ويمكن استخراج العلاقة (6) كما يلي:

نفترض أن المسافة الفاصلة بين ذروة العدسة واللوح الزجاجي المستوي تساوي t_0، حينئذٍ تصبح العلاقة (3) التي تعطي مواقع الحلقات المظلمة، كما يلي:

$2(t+t_0) = n\lambda$ من أجل الحلقة المظلمة التي رتبة تداخلها n.

$2(t'+t_0) = n'\lambda$ من أجل الحلقة المظلمة التي رتبة تداخلها n'.

حيث: $t = \frac{r_n^2}{2R}$ و $t' = \frac{r_{n'}^2}{2R}$

فبتعويض هاتين القيمتين في العلاقتين السابقتين نجد:

$$\frac{r_{n'}^2}{R} + 2t_0 = n'\lambda \quad \text{و} \quad \frac{r_n^2}{R} + 2t_0 = n\lambda$$

وبطرح العلاقة الأولى من الثانية نجد:

$$\frac{1}{R}\left(r_{n'}^2 - r_n^2\right) = (n' - n)\lambda$$

ولكن الفرق $(n' - n)$ بين رتبتي التداخل عند الحلقتين المذكورتين يساوي الفرق $(n' - n)$ بين رقمي هاتين الحلقتين، لذلك يمكن كتابة العلاقة الأخيرة كما يلي:

$$r_{n'}^2 - r_n^2 = (n' - n)R\lambda$$

ويأخذ أقطار الحلقات عوضاً عن أنصاف أقطارها نجد العلاقة (6).

3. الأدوات والأجهزة

منبع ضوئي وحيد اللون (مصباح الصوديوم أو مصباح زئبق مع مرشح أخضر)، عدسة مقربة، لوح زجاجي صغير (على شكل قرص أحد وجهيه مستو استواءً ضوئياً) مع حامله، مجهر منزلق يمكن زلقه أفقياً في اتجاهين متعامدين، يمكن قياس مقدار انزلاقه بمسطرة مليمترية مزودة بمكرومتر يقيس بدقة $0.01mm$.

4. طريقة العمل

1. هيئ الأدوات على النحو المبين في الشكل3، فتتشكّل عدسة هوائية بين السطح المحدب للعدسة المقربة واللوح الزجاجي، ثم قم بإضاءة المصباح s.

2. حكّم عينية المجهر M على خطي المحكمة، ثم حكّم المجهر على العدسة الهوائية المكونة من القرص الزجاجي والعدسة المحدبة ذات البعد المحرقي الكبير التي يلامس وجهها المحدب هذا القرص في نقطة تقع مباشرةً تحت المجهر. (عملياً العدسة والقرص الزجاجي مثبتان ضمن إطار مزود بثلاثة لوالب تستخدم لضبط تكون حلقات دائرية يقع مركزها أقرب ما يمكن من مركز الإطار).

3. أدر اللوح الزجاجي G حول محور أفقي حتى يتخذ الوضع المبين في الشكل3 وحتى تصبح إضاءة حقل الرؤية في المجهر منتظمة وعلى أشدها. ازلق المجهر حتى تظهر حلقات نيوتن، ويقع مركزها على محور المجهر تقريباً. اضبط تحكيم المجهر بعدئذٍ لتظهر الحلقات واضحة تمام الوضوح.

4. ازلق المجهر أفقياً حتى تقع نقطة تقاطع خطي المحكّمة على مركز مجموعة حلقات نيوتن الدائرية، ثم ازلقه بعيداً عن هذا المركز، نحو اليمين مثلاً، وقم بتثبيت نقطة تقاطع خطي المحكّمة على منتصف الحلقة المضيئة الثانية وسجل قراءة المجهر الموافقة، ثم ازلق المجهر نحو اليسار، وخذ القراءة الموافقة للحلقة نفسها. احسب قطر هذه الحلقة. أعد نقطة تقاطع خطي المحكّمة من جديد إلى مركز الحلقات، ثم ازلق المجهر في هذه المرة نحو الأمام وخذ القراءة الموافقة للحلقة الثانية ، ثم نحو الخلف وسجل القراءة الموافقة، واستنتج قطر الحلقة.

5. ازلق المجهر أفقياً حتى تقع نقطة تقاطع خطي المحكّمة على مركز مجموعة حلقات نيوتن الدائرية، ثم ازلقه بعيداً عن هذا المركز، إلى اليمين مثلاً، وليكن ذلك شيئاً فشيئاً حتى تستطيع أن تحصي عدد الحلقات التي تمر أمام نقطة تقاطع خطي المحكّمة. توقف عن زلق المجهر حينما يصبح عدد الحلقات المضيئة المارة 25 حلقة مثلاً.

6. ازلق الآن المجهر بالاتجاه المعاكس حتى تقع نقطة تقاطع خطي المحكمة على الحلقة المضيئة ذات الرقم 20 بدءاً من مركز الحلقات. سجل حينئذٍ قراءة المسطرة والمكرومتر ولتكن A_{20}.



الشكل3

استمر في زلق المجهر في الاتجاه نفسه، وسجل قراءات المسطرة والمكرومتر حين تقع نقطة تقاطع خطي المحكّمة على الحلقات المضيئة 18، 16، 14، ...، 2 ولتكن هذه القراءات A_n. تابع زلق المجهر في الاتجاه نفسه، وسجل قراءات المسطرة والمكرومتر حين تقع نقطة تقاطع خطي المحكّمة على الجزء الأيسر من الحلقات المضيئة 2، 4، 6، ...، 20. ولتكن هذه القراءات B_n. إن المقدار $d_n = |B_n - A_n|$ يدل إذن على قطر الحلقة المضيئة ذات الرقم n.

7. رتب نتائجك في جدول كالتالي:

$d^2(cm^2)$	$A-B=d(cm)$	$B(cm)$	$A(cm)$	رقم الحلقة n
				2
				4
				6
				⋮
				8

5. تحليل النتائج والمناقشة

1- ارسم الخط البياني لتغير d^2 بتغير n. تحقق من أن هذا الخط مستقيم كما تدل على ذلك العلاقة 6.

2- احسب نصف قطر انحناء وجه العدسة الكروي R بقياس ميل الخط البياني والتعويض عن λ بقيمتها $0.546\,\mu m$ (أخضر الزئبق في حال استخدام المرشح الأخضر) أو $0.589\,\mu m$ (ضوء الصوديوم).

3- احسب كذلك الارتياب المطلق ΔR المرتكب في حساب R بالاعتماد على الخطأ الأعظمي المرتكب في تقدير ميل الخط البياني.

التجربة (9)

تجربة ملد

(الأمواج المستقرة العرضانية في بعد واحد)

1. هدف التجربة

دراسة الاهتزازات العرضية في الأوتار المهتزة والتحقق من قوانينها.

2. المبدأ النظري

لننظر في حالة وتر مثبت من أحد طرفيه، كما هو مبين في الشكل1 حيث الطرف O هو النقطة المثبتة. فعندما ترد موجة عرضانية $\xi = \xi_0 \sin(\omega t + k x)$ متحركة نحو اليسار (حيث $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ العدد الموجي) فإنها تنعكس عند O مولدة موجة جديدة $\xi = \xi_0' \sin(\omega t - kx)$ تنتشر نحو اليمين. ويكون الانزياح في أي نقطة من الوتر ناجماً عن تداخل أو تراكب الموجتين الواردة والمنعكسة، أي:

$$\xi = \xi_0 \sin(\omega t + kx) + \xi_0' \sin(\omega t - kx) \qquad (1)$$

وعند النقطة O لدينا $x = 0$، بحيث إن:

$$\xi_{(x=0)} = (\xi_0 + \xi_0') \sin \omega t$$

ولكن O مثبتة، وهذا يعني أن $\xi_{(x=0)} = 0$ في كل لحظة. وهذا يستدعي أن يكون $\xi_0' = -\xi_0$. وبعبارة أخرى، تعاني الموجة تغيراً في الطور يساوي π عندما تنعكس على الطرف المثبت. ويمكن ملاحظة هذا التغير في الطور في سلسلة الصور الفوتوغرافية على الشكل1 التي تبين نبضة لدى ورودها وبعد انعكاسها. وهكذا تصبح المعادلة (1) كما يلي:

$$\xi = \xi_0[\sin(\omega t + k x) - \sin(\omega t - kx)]$$

وباستخدام العلاقة المثلثاتية $\sin\alpha - \sin\beta = 2\sin\frac{1}{2}(\alpha - \beta)\cos\frac{1}{2}(\alpha + \beta)$

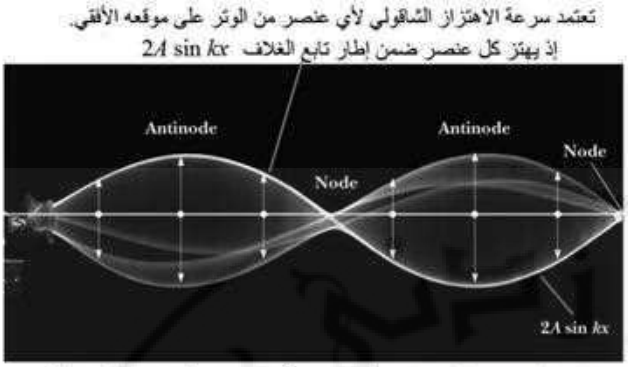
نحصل على:

$$\xi = 2\xi_0 \sin kx \cos \omega t \qquad (2)$$

وتختفي العبارتان $\omega t \pm k x$ ولا تعود المعادلة (2) تعبر عن موجة متقدمة، وإنما تُمثل في الواقع حركة جيبية تتغير سعتها من نقطة لأخرى تبعاً للعلاقة:

$$A = 2\xi_0 \sin k\,x \qquad (3)$$

وقد مُثلت هذه السعة بمجموعة المنحنيات المرسومة في الشكل 1. تنعدم السعة من أجل $k\,x = n\,\pi$ حيث n عدد صحيح. ويمكن كتابة هذه العلاقة على النحو التالي:



الشكل 1. تغير طور الموجة المنعكسة عن وتر مثبت من أحد طرفيه

$$x = \tfrac{1}{2}\, n\,\lambda \qquad (4)$$

وتسمى هذه النقاط عقداً. وتساوي المسافة الفاصلة بين كل عقدة والتي تليها λ $\frac{1}{2}$. وإذا تذكرنا العلاقة، $c = \sqrt{T/\mu}$ (الواردة في دروسنا النظرية) التي تعطي سرعة انتشار الأمواج في وتر مشدود بتوتر T وكتلة وحدة الطول فيه μ، أمكننا كتابة العبارة التالية لطول الموجة:

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega}\sqrt{T/\mu} \qquad (5)$$

ويكون λ اختيارياً طالما كان التواتر الزاوي ω اختيارياً أيضاً.

لنفترض الآن أننا وضعنا شرطاً ثانياً: وهو أن النقطة $x = L$، التي يمكن أن تكون الطرف الآخر من الوتر، هي أيضاً مثبتة. وهذا يعني أن النقطة $x = L$ عقدة، وينبغي أن تحقق الشرط $k\,L = n\,\pi$. وعلى هذا، إذا استخدمنا المعادلة (4) وجدنا:

$$\lambda = \frac{2L}{n} = 2L, \frac{2L}{2}, \frac{2L}{3} \qquad \text{أو} \qquad L = \frac{1}{2} n\,\lambda \qquad (6)$$

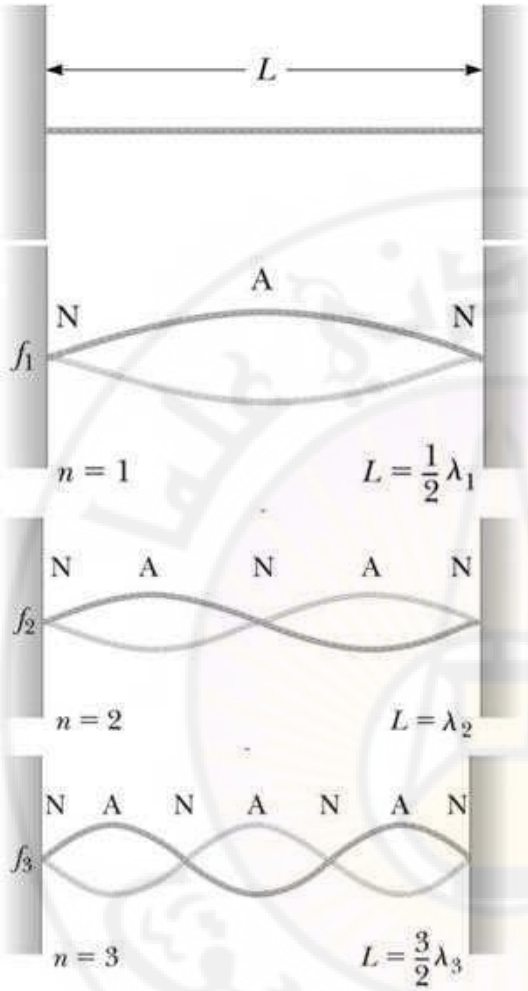
وهذا الشرط الثاني يحدد بنفسه الأطوال الموجية للأمواج التي يمكنها أن تنتشر في الوتر وتبقى مستقرة بالقيم المعطاة بالمعادلة (6)، وفي نفس الوقت، وتبعاً للمعادلة (5)، فإن تواترات الاهتزازات هي محددة أيضاً بالقيم التالية:

$$f_n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}} = f_1, 2f_1, 3f_1, \ldots \qquad \text{حيث:} \qquad f_1 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}} \qquad (7)$$

ويسمى التواتر الأساسي *fundamental frequency*. إن تواترات الاهتزازات الممكنة (المسماة مدروجات *harmonics*) هي كلها مضاعفات التواتر الأساسي ويمكننا القول إن التواترات

والأطوال الموجية هي مقادير كمومية (مكماة) *quantized*، وإن التكمية هي نتيجة للشروط الحدية المفروضة على طرفي الوتر. وهذا وضع يظهر في الكثير من القضايا الفيزيائية التي ستمر معنا كثيراً فيما بعد.

مثال: وتر فولاذي طوله $40cm$ وقطره $1mm$. فإذا علمت تواتره الأساسي $440\,s^{-1}$، الموافق للنغمة الموسيقية La_3، أوجد توتره. (نفترض الكتلة الحجمية $\rho = 7.86\times10^{3}\,kgm^{-3}$ للوتر).



الشكل2. **الموجة المستقرة العرضانية في وتر مثبت من طرفيه**

الحل: إن كتلة وحدة الطول هي $\mu = \pi r^2 \rho$. إذا عوضنا $r = 5\times10^{-4}\,m$ و $\rho = 7.86\times10^{3}\,kgm^{-3}$، نجد $\mu = 6.17\times10^{-3}\,kgm^{-1}$. ولما كان المطلوب حساب التوتر T من أجل التواتر الأساسي. فإننا نستعمل المعادلة (7) بأن نضع فيها $n=1$ فنجد $T = 4L^2\mu f_1^{\,2}$. وبالتعويض عن L و f_1 بقيمتيهما: $L = 40\,\text{cm} = 0.40\,\text{m}$ و $f_1 = 440\,s^{-1}$، وباستعمال قيمة μ التي حسبناها، نجد $T = 764.5\ N$.

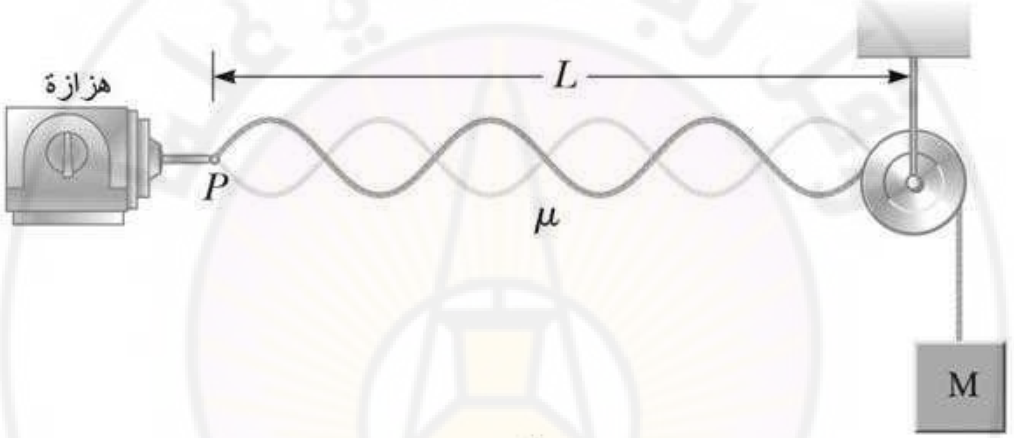
يمكن للطالب أن يتبين الآن أن الآلات الموسيقية الوترية تُضبط (تُدوزن) إما بتعديل توترات أوتارها وإمّا أطوالها.

تدل الدراسة النظرية على أن سرعة انتشار الاضطراب وفق طول الوتر أو السلك المشدود تعطى، كما ذكرنا أعلاه بالعلاقة:

$$c = \sqrt{T/\mu} \qquad (8)$$

حينما يكون الوتر مثبتاً عند طرفيه تتكون عقدة في كل طرف، وحين تحدث فيه أمواج مستقرة يتكون بين طرفيه عدد صحيح n من المغازل المتماثلة يبلغ طول كل منها $\lambda/2$ حيث λ طول الموجة فإذا كان اهتزاز السلك يوافق الصوت الأساسي كان هناك مغزل واحد فيكون طول الموجة في هذه الحالة مساوياً ضعف طول السلك L ويحقق العلاقة:

$$f_1 \lambda_1 = c = \sqrt{T/\mu}$$



الشكل3. تجربة ملد باستخدام هزازة

حيث يدل f_1 على تواتر الصوت الأساسي ويساوي:

$$f_1 = \frac{1}{\lambda}\sqrt{T/\mu}$$

ويمثل الشكل 2 (العلوي) اهتزاز السلك في هذه الحالة.

ويمكن للسلك أن يهتز بحيث يصدر مدروجات الصوت الأساسي (تواترها أضعاف f_1)، فإذا قسنا الطول L بين عقدتين يقع بينهما عدد n من المغازل كان لدينا:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad \text{أو} \quad L = n\frac{\lambda}{2} \qquad (9)$$

ولكن $c = f\lambda$ نعوض في هذه العلاقة عن كل من c و λ بما تساويه وفقاً للعلاقتين (8) و (9) فنجد:

$$f = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}} = \frac{1}{\lambda}\sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \text{أو} \quad \sqrt{\frac{T}{\mu}} = f\lambda = f\frac{2L}{n} \qquad (10)$$

وتدل هذه العلاقة الأخيرة على أنه من أجل سلك معين (μ ثابتة القيمة) ومن أجل تواتر ثابت f يكون $\frac{\sqrt{T}}{\lambda}$ = ثابت، أي إن الخط البياني لتغيرات λ^2 بدلالة T هو خط مستقيم، وهو ما يراد التحقق منه في هذه التجربة التي تعتمد على أنه لدى مرور تيار متناوب تواتره f (تواتر تيار المدينة 50Hz) في سلك نحاسي واقع في حقل مغنطيسي منتظم تتولد قوة كهرطيسية تجعل السلك يهتز بالتجاوب من أجل قيم معينة لقوة الشد T، بتواتر يساوي f أو مدروجاته، ويصبح السلك مقراً لموجات مستقرة تبدو العقد فيها نقاطاً ساكنة لا حركة فيها وبطون الاهتزازات في المغازل كبيرة السعة.

3. الأدوات والأجهزة

سلك نحاسي منتظم المقطع، بكرة مع حامل مثبت بالطاولة، مغنطيس طبيعي بشكل U، محولة تيار متناوب، أسلاك توصيل، ملزمة تحمل لوحاً معزولاً فيه مربط كهربائي. مقياس للطول، ومجموعة من الكتل المختلفة، وكفة ميزان.

4. طريقة العمل

1. اجعل السلك النحاسي الذي ثبت أحد طرفيه عند المربط الكهربائي في اللوحة العازلة يمر على البكرة المعدنية وينتهي طرفه بكفة ميزان.

2. صل أحد مربطي المحولة الكهربائية عن طريق قاطعة بالمربط الكهربائي في اللوحة العازلة ثم صل المربط الآخر بإطار الطاولة المعدني الذي ينقل التيار الكهربائي إلى طرف السلك المستند إلى البكرة.

3. ضع المغنطيس الطبيعي بحيث يقع منتصف السلك بين فرعيه متعامداً معهما. أغلق القاطعة الكهربائية وحمّل الكفة بكتل صغيرة متزايدة حتى يهتز السلك متجاوباً مع التواتر المطبق وتحدث فيه أمواج مستقرة واضحة على شكل مغازل العقد فيها ثابتة ساكنة (سجل الكتلة الموافقة M).

(**ملحوظة مهمة:** تجنب إضافة كتل كبيرة دفعة واحدة؛ لأنك ربما تمر بحالة تجاوب من أجل كتلة أصغر من دون أن تلاحظها. تجنب أيضاً إمرار التيار في السلك لفترة طويلة، وذلك

تجنباً لتمدده بارتفاع درجة حرارته، والحصول على العدد نفسه من المغازل من أجل كتل مختلفة، وهي نتيجة غير مقبولة).

4. قس المسافة L التي تفصل بين العقدتين في أقصى طرفي السلك بإهمال المغزلين (عند البكرة وعند المربط الكهربائي). احسب طول الموجة λ من العلاقة (9) أي $\lambda = 2L/n$، حيث يدل n على عدد المغازل بين العقدتين المعتمدتين.

5. كرر العمل بالفقرتين 3 و 4 وسجل قيم M وقيم λ الموافقة لها وخذ قيمة الكتلة الخطية، ونظّم النتائج في جدول كالتالي:

M	$F = T = (M + M')g$	L	n عدد المغازل	$\lambda = 2L/n$	λ^2

حيث $g = 980 cm/s^2$ و M' كتلة الكفة.

5. تحليل النتائج والمناقشة

1. ما وحدة القوة في جملة الواحدات السغثية (سنتمتر، غرام، ثانية) وما هي وحدة القوة في جملة الواحدات الدولية (كيلوغرام، متر، ثانية)؟ وما هي العلاقة بينهما؟

2. ارسم الخط البياني λ^2 بدلالة $T = F$، احسب ميله واستنتج قيمة f مرة بتطبيق جملة الواحدات السغثية ومرة بتطبيق جملة الواحدات الدولية، ما عدد المراتب التي تختلف بها إحدى القيمتين عن الأخرى؟ علل إجابتك. علام تدل هذه القيمة؟

3. اختر إحدى التجارب واحسب قيمة f من العلاقة (10) بعد معرفة قيمة μ ثم احسب الارتياب المطلق المرتكب في حساب قيمة f باتباع طريقة التفاضل اللغارتمي.

4. ما مضمون فرضية بور في المدارات الإلكترونية المستقرة؟ وما أوجه التشابه والاختلاف بينها وبين ما يحدث في تجربتك؟ تحدث عن مفهوم التكمية في الحالتين.

التجربة (10)

النواسان المترابطان

1. هدف التجربة

دراسة كل من حالتي الاهتزاز الأساسيتين للنواس المترابط (الاهتزاز على التوافق والاهتزاز على التعاكس) وحالة انضمام الاهتزازين الأساسيين (حالة الخفقان).

2. التمهيد النظري

يتألف النواس المترابط من نواسين مركبين متماثلين؛ يتألف كل منهما من قضيب كتلته m_1 في نهايته كتلة أسطوانية الشكل m_2. ينزلق على القضيب خطاف لتعليق نابض الترابط كما هو مبين في الشكل1، أو لتعليق كتلة الترابط (الشكل2).



الشكل1. النواس المترابط، بنابض

إن عزم العطالة I لكل من النواسين المركبين بالنسبة لمحور الدوران يساوي مجموع عزم عطالة القضيب I_1 وعزم عطالة الأسطوانة الكبيرة I_2 حيث:

$$I_1 = \frac{1}{3} m_1 L_1^2 \qquad (1)$$

$$I_2 = m_2 L_2^2 \qquad (2)$$

نظراً لصغر أبعاد الأسطوانة بالنسبة إلى طول القضيب فيمكن عدها نقطة مادية فنكتب:

$$I = I_1 + I_2 \qquad (3)$$

ولما كانت الكتلة الكلية للنواس المركب تساوي $m = m_1 + m_2$، فإن مركز ثقل النواس s يبتعد عن محور الدوران بالمسافة b (الشكل2) التي يمكن حسابها من علاقة دور النواس.

$$T_0 = 2\pi\sqrt{I/mgb} \qquad (4)$$

يؤدي الترابط بين النواسين إلى وجود قوى يؤثر بها أحد النواسين في النواس الآخر، فينجم عن ذلك تغير في حركتيهما (كتغير سعة الاهتزاز وتواتره).

نفرض أن الاحتكاك معدوم، وأن الاهتزازات صغيرة السعة، أي إن الاهتزازات غير متخامدة

و $tg\varphi \approx \varphi \approx \sin\varphi$، ونفترض بالإضافة إلى ذلك أن نابض الترابط الذي يصل بين النواسين (أو كتلة الترابط) مهمل الكتلة ولا يؤثر بأي قوة في النواسين حين يتساوى انحرافهما. وعلى هذا يكون النواسان في حالة السكون شاقوليين ونابض الترابط غير مشدود.

1. المعادلات التفاضلية لحركة النواس المترابط

لنفترض الآن وضعاً ما للنواسين في أثناء حركتيهما: ولـيكن النـواس1 منحرفاً عـن وضـع السـكون بالزاويـة φ_1، والنـواس 2 منحرفاً عـن وضـع السـكون بالزاويـة φ_2 (الشكل3).

يؤثر النابض في النواس1 بالقوة:

$$F = k(s_2 - s_1) = k(\varphi_2 - \varphi_1)r \quad (5)$$

ويؤثر في النواس2 وفقاً لمبدأ تساوي الفعل ورد الفعل، بالقوة:

$$-F = -k(s_2 - s_1) = k(\varphi_1 - \varphi_2)r \quad (6)$$

حيث: $s_1 = r\varphi_1$ و $s_2 = r\varphi_2$

(تعدّ الزوايا والمسافات والقوى إلى اليمين موجبة وإلى اليسار سالبة)، وعلى هذا الأساس تكتب المعادلتان التفاضليتان لحركة النواس المترابط بالشكل:



الشكل2. نواسان مترابطان بكتلة

$$I\frac{d^2\varphi_1}{dt^2} + mgb\varphi_1 - k(\varphi_2 - \varphi_1)r^2 = 0 \quad (7)$$

$$I\frac{d^2\varphi_2}{dt^2} + mgb\varphi_2 - k(\varphi_1 - \varphi_2)r^2 = 0 \quad (8)$$

وبافتراض أن $mgb = D$ و $kr^2 = C$ تصبح المعادلتان السابقتان:

$$I\frac{d^2\varphi_1}{dt^2} + D\varphi_1 = C(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (9)$$

$$I\frac{d^2\varphi_2}{dt^2} + D\varphi_2 = C(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (10)$$

2. حل جملة المعادلتين التفاضليتين

نجمع المعادلتين (9) و (10) فنجد:

$$I\frac{d^2(\varphi_1 + \varphi_2)}{dt^2} + D(\varphi_1 + \varphi_2) = 0 \quad (11)$$

ثم نطرح المعادلة (10) من (9) فنجد:

$$I\frac{d^2(\varphi_1-\varphi_2)}{dt^2} + (D+2C)(\varphi_1-\varphi_2)=0 \quad (12)$$

وبإدخال المتحولين الجديدين:

$$u=(\varphi_1+\varphi_2) \quad (13)$$

$$v=(\varphi_1-\varphi_2) \quad (14)$$

يمكننا كتابة المعادلتين (11) و (12) على النحو التالي:

$$I\frac{d^2u}{dt^2}+Du=0 \quad (15)$$

$$I\frac{d^2v}{dt^2}+(D+2C)v=0 \quad (16)$$

وهما معادلتان تفاضليتان تعبّر كل منهما عن حركة اهتزازية جيبية، الأولى بتواتر زاوي:

$$\omega_1=\sqrt{D/I} \quad (17)$$

ودور يساوي:

$$T_1=2\pi\sqrt{I/D} \quad (18)$$

والمعادلة الثانية بتواتر زاوي:

$$\omega_2=\sqrt{(D+2C)/I} \quad (19)$$

ودور يساوي:

$$T_2=2\pi\sqrt{I/(D+2C)} \quad (20)$$

والحل العام لهاتين المعادلتين هو حينئذٍ:

$$u(t)=a_1\cos\omega_1 t+b_1\sin\omega_1 t \quad (21)$$

$$v(t)=a_2\cos\omega_2 t+b_2\sin\omega_2 t \quad (22)$$

وبالعودة إلى المتحولين φ_1 و φ_2 نجد:

$$\varphi_1(t)= \frac{1}{2}\begin{pmatrix} a_1\cos\omega_1 t+b_1\sin\omega_1 t \\ +a_2\cos\omega_2 t+b_2\sin\omega_2 t \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\varphi_2(t)= \frac{1}{2}\begin{pmatrix} a_1\cos\omega_1 t+b_1\sin\omega_1 t \\ -a_2\cos\omega_2 t-b_2\sin\omega_2 t \end{pmatrix} \quad (24)$$

يدعى ω_1 و ω_2 عادة بالتواترين الزاويّين الأساسيين للاهتزاز في حالة الترابط.

3. مناقشة الحل العام

تكون الثوابت a_1 و a_2 و b_1 و b_2 مجهولة، وتتعين بالشروط الابتدائية للحركة، أي بالزاويتين الابتدائيتين وبالسرعتين الزاويتين الابتدائيتين، وهي عادةً متعددة ومختلفة، وسنقتصر في تجربتنا هنا على دراسة حالات التوافق والتعاكس والخفقان، فإذا ترك النواسان في هذه الحالات عند لحظة البدء $(t=0)$ دون سرعة زاوية يكون:

$$(d\varphi_1/dt)_{t=0}=0 \text{ و } (d\varphi_2/dt)_{t=0}=0$$

وعلى هذا الأساس نحصل من المعادلتين (23) و (24) على:

$$(d\varphi_1/dt)_{t=0}=\tfrac{1}{2}(b_1\omega_1+b_2\omega_2)=0 \quad (25)$$

$$(d\varphi_2/dt)_{t=0}=\tfrac{1}{2}(b_1\omega_1-b_2\omega_2)=0 \quad (26)$$

بالجمع نجد أن $b_1\omega_1 = 0$ ولما كان $\omega_1 \neq 0$، فيجب أن يكون $b_1 = 0$. وبالمثل نجد عندما نطرح يجب أن يكون $b_2 = 0$. ومِنْ ثَمَّ $b_1 = b_2 = 0$.

ومِنْ ثَمَّ تختصر المعادلتان (24) و(23) على الصورة التالية:

$$\varphi_1(t) = \tfrac{1}{2}\left(a_1 \cos\omega_1 t + a_2 \cos\omega_2 t\right) \quad (27)$$

$$\varphi_2(t) = \tfrac{1}{2}\left(a_1 \cos\omega_1 t - a_2 \cos\omega_2 t\right) \quad (28)$$

أما تعيين الثابتتين a_1 و a_2 في المعادلتين السابقتين (27) و(28) فيتحدد من أجل كل حالة من الحالات الثلاث (توافق وتعاكس وخفقان) بصورة مختلفة.

❶ الاهتزاز على التوافق

فإذا كان الشرط الابتدائي:

$$\varphi_1(0) = \varphi_2(0) = \varphi_0$$

وبذلك نحصل من المعادلتين (27) و (28) على:

$$\varphi_1(0) = \tfrac{1}{2}(a_1 + a_2) = \varphi_0$$

$$\varphi_2(0) = \tfrac{1}{2}(a_1 - a_2) = \varphi_0$$

ومِنْ ثَمَّ نجد:

$$a_1 = 2\varphi_0 \text{ و } a_2 = 0$$

$$\varphi_1(t) = \varphi_2(t) = \varphi_0 \cos\omega_1 t \quad (29)$$

ويهتز النوّاسان في هذه الحالة بالتواتر الأساسي الأول نفسه $\omega_1 = \sqrt{D/I}$ الذي



الشكل3. الاهتزاز على التوافق

يساوي التواتر الخاص للنواس غير المترابط (الشكل3) ومِنْ ثَمَّ فهما يهتزان على التوافق.

❷ الاهتزاز على التعاكس

أما إذا أزحنا النواسين باتجاهين متعاكسين بالإزاحة نفسها:

$$\varphi_1(0) = -\varphi_2(0) = \varphi_0$$

ونحررهما في اللحظة $t = 0$

$$\varphi_1(0) = \tfrac{1}{2}(a_1 + a_2) = \varphi_0$$

$$\varphi_2(0) = \tfrac{1}{2}(a_1 - a_2) = -\varphi_0$$

$$a_1 = 0 \text{ و } a_2 = 2\varphi_0$$

$$\varphi_1(t) = -\varphi_2(t) = \varphi_0 \cos\omega_2 t \quad (30)$$

يهتز النواسان في هذه الحالة من جديد بالتواتر نفسه، ولكن بالتواتر الأساسي الثاني: $\omega_2 = \sqrt{\dfrac{(D+2C)}{I}}$

وبالسعة نفسها φ_0 إنما بفرق في الطور قدره π (الشكل4)، فهما يهتزان على التعاكس.

هنا يجب ملاحظة أن ω_2 تتعلق كثيراً بشدة الترابط نتيجة وجود C.



الشكل4. الاهتزاز على التعاكس

❸ اهتزاز الخفقان

وفي حال جعلنا أحد النواسين وليكن النواس 2 مثلاً ثابتاً في البدء عند وضع توازنه وأزحنا النواس1 (الشكل5):

$$\varphi_1(0)=\varphi_0 \quad \text{و} \quad \varphi_2(0)=0$$

لحظة البدء $t=0$ نترك النواسين وشأنهما:

$$\varphi_1(0)=\tfrac{1}{2}(a_1+a_2)=\varphi_0$$

$$\varphi_2(0)=\tfrac{1}{2}(a_1-a_2)=0$$

$$a_1=a_2=\varphi_0$$

ومنه نجد:



الشكل5. اهتزاز الخفقان

$$\varphi_1(t)=\frac{\varphi_0}{2}(\cos\omega_1 t+\cos\omega_2 t)$$

$$\varphi_2(t)=\frac{\varphi_0}{2}(\cos\omega_1 t-\cos\omega_2 t)$$

ووفق القواعد المثلثاتية يمكننا كتابة هاتين المعادلتين على الصورة التالية:

$$\varphi_1(t)=\varphi_0\cos\frac{\omega_2-\omega_1}{2}t\cos\frac{\omega_1+\omega_2}{2}t \qquad (31)$$

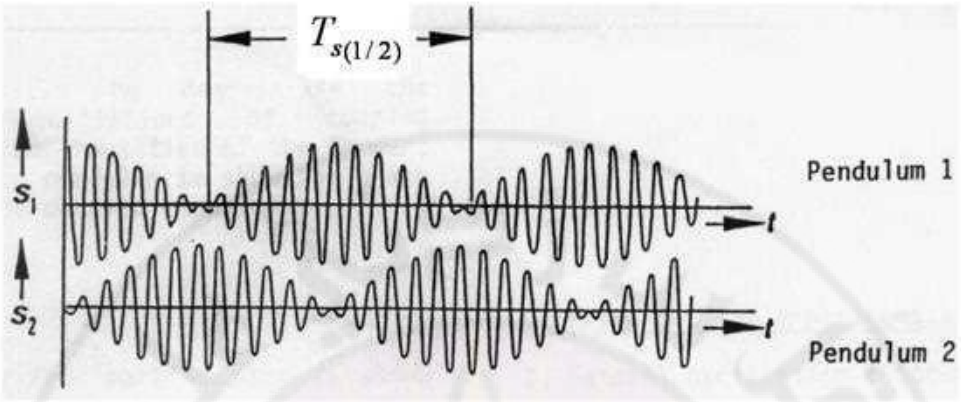
$$\varphi_2(t)=+\varphi_0\sin\frac{\omega_2-\omega_1}{2}t\sin\frac{\omega_1+\omega_2}{2}t \qquad (32)$$

يبين الشكل6 تغير كل من التابعين $\varphi_1(t)$ و $\varphi_2(t)$ بدلالة الزمن.

وفي حالة الترابط الضعيف، أي من أجل $\omega_1\approx\omega_2$ ومِنْ ثَمَّ:

$\omega_2-\omega_1 \ll \omega_1+\omega_2$ يتغير الحدان

$$\cos\frac{\omega_2-\omega_1}{2}t \quad \text{و} \quad \sin\frac{\omega_2-\omega_1}{2}t$$



الشكل6. الخفقات التي يحدثها كل من النواسين (بتطبيق شروط الخفقان)

بـبطء مـع الـزمن؛ لأن التـواتر $\frac{\omega_2-\omega_1}{2}$ صـغير، أمـا الحـدان $\sin\frac{\omega_1+\omega_2}{2}t$ و $\cos\frac{\omega_1+\omega_2}{2}t$ فيتغيران مع الزمن بصورة أسرع، ولـذا يمكننـا النظـر إلـى $\varphi_1(t)$ أو $\varphi_2(t)$ كحاصل ضرب اهتزازة سريعة تواترها $\frac{\omega_1+\omega_2}{2}$ فـي اهتـزازة بطيئـة تواترهـا $\frac{\omega_2-\omega_1}{2}$، فنقول إن لدينا تكييفاً سعوياً أي إن السعة ليست ثابتة، بل تتغير تبعاً للفارق بين التواترين، وتختلف $\varphi_1(t)$ عن $\varphi_2(t)$ بطور قدره $\pi/2$.

يُعطى الزمن الكلي T_S للاهتزازة المترابطة (دور تابع السعة) والذي ندعوه عادةً بدور الخفقان بالعلاقة (انظر إلى نصف دور على الشكل6).

وعليه فإنه يساوي ضعف المجال الزمني بين سكونين متتاليين لأحد النواسين.

وتعرّف درجة الترابط χ بالنسبة:

$$\frac{2\pi}{T_S}=\omega_S=\frac{\omega_2-\omega_1}{2}$$

$$T_S=\frac{4\pi}{\omega_2-\omega_1}=2\left(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right)^{-1} \quad (33)$$

$$\chi=\frac{C}{C+D} \quad (34)$$

نستخلص من المعادلة (17):

$$D=I\,\omega_1^2$$

ومن المعادلة (19):

$$C=\tfrac{1}{2}(I\,\omega_2^2-D)$$

ومِنْ ثَمَّ تكون درجة الترابط:

$$\chi=\frac{T_1^2-T_2^2}{T_1^2+T_2^2} \quad (35)$$

ومن جهة أخرى، هنالك علاقة مهمة تربط بين التواتر ω_2 والمقدار r نحصل عليها كما يلي:

$$C = k\,r^2$$
$$= \tfrac{1}{2}\left(I\,\omega_2^2 - D\right) = \tfrac{1}{2} I\left(\omega_2^2 - \omega_1^2\right)$$

ومنها:

$$\omega_2^2 = \frac{2k}{I} r^2 + \omega_1^2 \qquad (36)$$

وهي علاقة خطية بين r^2 و ω_2^2 تؤول فيها ω_2 كما هو متوقع إلى ω_1 عندما $r = 0$.

3. الأدوات والأجهزة

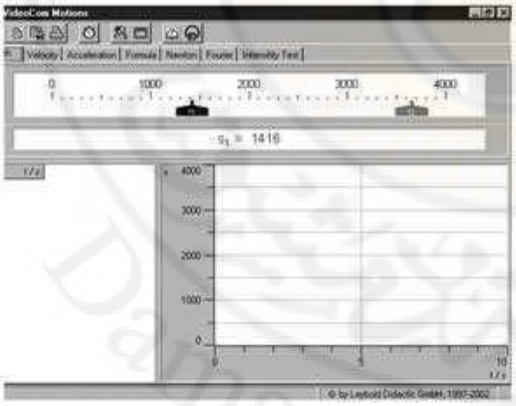
حامل للنواس المترابط الذي يتألف من نواسين مركبين يتكون كل منهما من قضيب طوله $85cm$، وكتلته $(132gm)$. في القضيب فتحة 1a وعليه خطاف متحرك 1b$(9gm)$ وكتلة أسطوانية متحركة 1c$(165gm)$. يجري الاقتران بين النواسين بنابض اقتران أو بكتلة فيها فتحة 2a$(24gm)$ يمكن أن تحل محل النابض، مسطرة مدرجة، ميزان، كرونومتر (مقياس للزمن)، كاميرا (الفيديوكوم *videocom*) (راجع الملحق في نهاية التجربة) (لتسجيل الحركات الاهتزازية للنواس) مرتبطة بحاسب لقياس أدوار الاهتزاز.

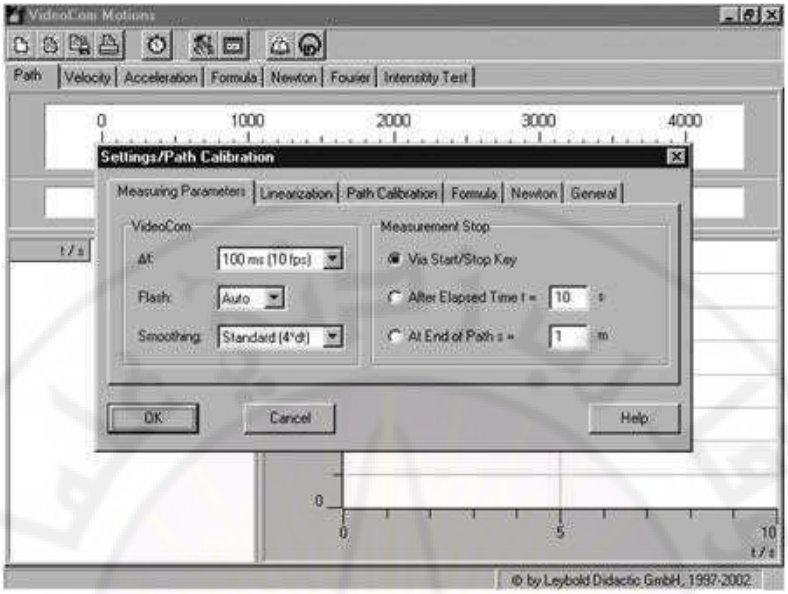
4. طريقة العمل

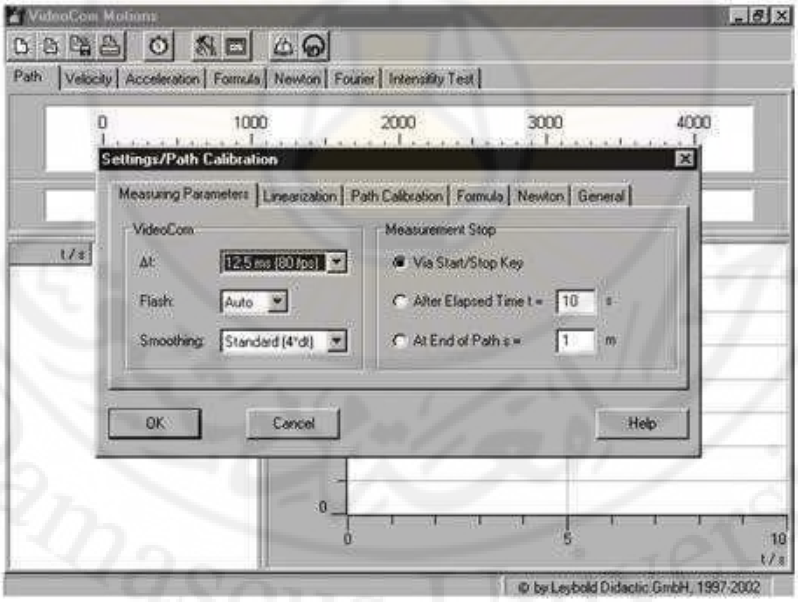
للبدء بقياس أدوار الاهتزاز قم بتشغيل الكاميرا والحاسب، وانقر على أيقونة VideoCom على الحاسب، فتظهر الرسالة التالية، اضغط على OK.

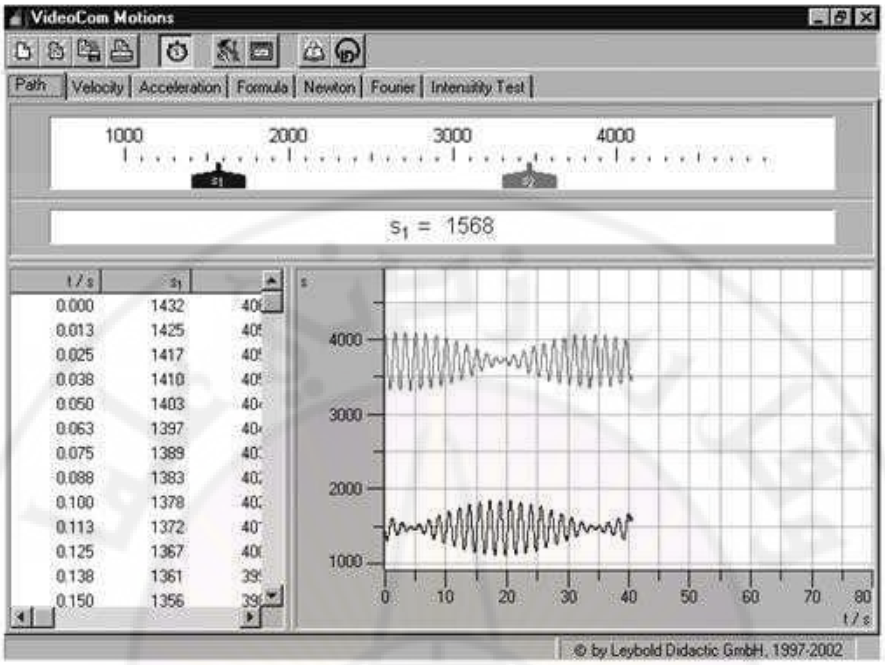


فتظهر لك الشاشة التالية، التي يظهر فيها كل من النواسين بلونين مختلفين.




VideoCom Motions
Path
Velocity
Acceleration
Formula
Newton
Fourier
Intensity Test
0
1000
2000
3000
4000
Settings/Path Calibration
Measuring Parameters
Linearization
Path Calibration
Formula
Newton
General
VideoCom
Δt:
100 ms (10 fps)
Flash:
Auto
Smoothing:
Standard (4*dt)
Measurement Stop
Via Start/Stop Key
After Elapsed Time t =
10
s
At End of Path s =
1
m
OK
Cancel
Help
t / s
0
5
10
© by Leybold Didactic GmbH, 1997-2002


VideoCom Motions
Path
Velocity
Acceleration
Formula
Newton
Fourier
Intensity Test
0
1000
2000
3000
4000
Settings/Path Calibration
Measuring Parameters
Linearization
Path Calibration
Formula
Newton
General
VideoCom
Δt:
12.5 ms (80 fps)
Flash:
Auto
Smoothing:
Standard (4*dt)
Measurement Stop
Via Start/Stop Key
After Elapsed Time t =
10
s
At End of Path s =
1
m
OK
Cancel
Help
t / s
0
5
10
© by Leybold Didactic GmbH, 1997-2002



1. قياس دور الاهتزاز الطبيعي (من دون اقتران):

– علّق القضيبين على الحامل من خلال فتحة كل منهما 1a بحيث يبعد أحدهما عن الآخر بمقدار 30cm حتى يتمكنا من الاهتزاز بحرية.

– قس دور كل من النواسين T_0، بالاستعانة بكاميرا فيديو كوم الموصولة بالحاسب، ولاحظ أنه لا ضرورة في هذه الحالة لأخذ المتوسط الحسابي لعدد كبير من النوسات، إذ يكفي قياس مدة عدد قليل من النوسات، لماذا في رأيك؟ فإذا قمت بقياس المدة التي تستغرقها عشر اهتزازات $10T_0$ مثلاً فيمكن تحديد الدور الطبيعي T_0 ومِنْ ثَمَّ التواتر الطبيعي $f_0 = \frac{1}{T_0}$.

للحصول على الدور نفسه T_0 للنواسين، قم بضبط وضع إحدى الأسطوانتين بالنسبة إلى الأخرى بزلقها على القضيب.

– احسب عزم عطالة كل من النواسين I وبعد مركز ثقل النواس عن محور الدوران b وكذلك الثابتة D.

ملاحظة مهمة. لإجراء المراحل اللاحقة يترتب البدء من أسفل النواس.

2. قياس دوري الاهتزازين الأساسيين:

علق كتلة الاقتران وفقاً للشكل3، وذلك:

- بإمرار خيط (طوله نحو نصف متر) من فتحة كتلة الاقتران.

- وتحريك الخطافين إلى الارتفاع نفسه r الذي يطلق عليه طول الترابط، ووصلهما بالخيط الذي يمر من فتحة كتلة الاقتران.

- أزح النواسين في الاتجاه نفسه وبالاتساع نفسه (نحو $6cm$)، كما هو موضح في الشكل3، ودعهما يهتزان، قم بقياس زمن عشر اهتزازات $10T_1$ ولعدة مرات. احسب التواتر f_1 للاهتزاز الأساسي الأول من القيمة الوسطية لـ T_1.

- أزح النواسين بالاتساع نفسه، ولكن باتجاهين متعاكسين، ثم قم بتحديد التواتر f_2 في حالة الاهتزاز الأساسي الثاني (الشكل4).

3. قياس دور الاهتزاز في حالة الخفقان ودور الخفقان

- قم بإزاحة النواس1، مع جعل النواس 2 ثابتاً (الشكل5)، وحرر النواسين في اللحظة نفسها. قم أولاً بقياس الزمن الموافق لخمس اهتزازات ($5T$) لأحد النواسين عدة مرات، واحسب التواتر f من القيمة الوسطية.

- ثم قم بقياس T_S بالنسبة للنواس الذي يكون في حالة سكون لحظة بدء الاهتزاز إلى أن يتوقف للمرة الأولى بعد خفقة واحدة. ثم قم بقياس T_S خمس مرات على الأقل، وعين تواتر الخفقان f_S من القيمة الوسطية.

4. قم بتعديل معامل الاقتران بإزاحة الخطافين إلى طول ترابط r جديد وكرر المرحلتين السابقتين اللتين تتضمنان قياس الأدوار T_1 و T_2 و T و T_S من أجل خمسة أطوال ترابط على الأقل، واحسب في كل مرة الثابتة C (لحساب الثابتة C ينبغي إما إعطاء قيمة ثابتة مرونة نابض الترابط k وإمّا تعيينها بطريقة الاستطالة السكونية للنابض). يمكن الاكتفاء في حال استخدام الكتلة في الترابط بملاحظة تغير الأدوار المذكورة بدلالة طول الترابط.

5. تحليل النتائج والمناقشة

1- قارن بين دور النواس غير المترابط T_0 ودور النواس المترابط T_1.

2- احسب دور الخفقان T_S من العلاقة (33) وقارنه بالقيمة المقيسة.

3- احسب درجة الترابط χ في حالة القيم المختلفة لـ r المأخوذة في الطلب 4، وذلك وفق العلاقة (35).

4- ارسم المنحني البياني ω_2^2 بدلالة r^2 واستنتج قيمة ω_1. قارن هذه القيمة بالقيمة المقيسة.

الملحق: كاميرا الفيديو كوم

VideoCom



الشكل7. الكاميرا فيديوكوم

إن كاميرا الفيديوكوم *videocom* مصممة لأن توصل بالحاسب من خلال وصلة بينية تسلسلية *serial interface*. تضم الكاميرا حساسات إلكترونية *CCD* (*charge coupled device*) تنتظم وفق خط مستقيم، وتستقبل الإشارات الضوئية المنعكسة عن الأجسام المهتزة وتترجمها إلى إشارات كهربائية تنقل للحاسب الذي يقوم بمعالجتها وتقييمها باستخدام البرنامج المرافق.

تسمح هذه الكاميرا بتسجيل الحركات الخطية بالإضافة إلى قياسات الشدة النسبية عن بعد وبدقة عالية.

من التجارب التي تعتمد على كاميرا الفيديوكوم

1- الحركة المنتظمة والمتسارعة على مسار ما، (معادلة نيوتن للحركة، تعريف نيوتن).

2- النواس الذي يتألف من قضيب (بما فيها النواسات المتعددة المترابطة).

3- تجارب التصادم (قانون نيوتن الثالث، الفعل يساوي رد الفعل).

4- السقوط الحر.

5- الانعراج من خلال شق أو شقوق متعددة أو شبكة الانعراج.

6- الانعراج عند حافة مستوٍ.

7- منحنيات المرشحات النفوذية.

ملحوظة. للحصول على أكبر فائدة من كاميرا الفيديوكوم يترتب على من يتعامل معها أن يتعرف على برنامجها وعلى كيفية استخدامه بشكل صحيح، لهذا الغرض يرجى قراءة نصوص المساعدة (في البرنامج) بعناية وطباعتها في حال الضرورة.

1. ملاحظات الأمان

- لا تستخدم لكمون التغذية إلّا وحدة التغذية 12VAC الخاصة.
- لا تعمل الكاميرا بشكل صحيح في حالة إضاءة الخلفية أو في ضوء النهار.
- حافظ على نظافة الكاميرا والحساسات الإلكترونية ولا تنظفها إلاّ بقطعة قماش قطنية مشربة بالكحول
- احفظ صفائح الانعكاس الخلفي في مكان بارد وجاف مع تجنب تعرضها للخدش. لا يتم تنظيفها إلّا بماء دافئ فيه كمية ضئيلة من سائل الجلي باستخدام قطعة من القماش الناعم.

2. وصف الكاميرا ومعطياتها التقنية ومجال استخدامها

A. وصف كاميرا الفيديوكوم (انظر الشكل 2)

1. عدسة قطرها نحو $50mm$ مثبتة ببراغي سداسية على جسم الكاميرا.
2. مجموعة من الثنائيات الضوئية *LED flash* تركب أمام العدسة، (يمكن التحكم بتواترها وشدة إضاءتها) وتوصل عبر المقبس5.
3. سوكة توصيل لكمون التغذية 12VAC بوحدة التغذية بمقبس كانون.
4. ميزان تسوية لضبط كاميرا الفيديوكوم شاقولياً (لتعيين ثابت الجاذبية باستخدام الجسم الساقط).
5. مقبس توصيل الثنائيات الضوئية.
6. مفتاح بدء القياس وانتهائه (يمكن التحكم به عن بعد من خلال الحاسب).
7. شاشة *LC* liquid crystal لإظهار الإعدادات والمساعدة في ضبط الكاميرا.

8. مفتاح النمط Mode لاختيار الفاصل الزمني والتبديل بين قياس الموضع والشدة (يمكن أيضاً إجراء الضبط عن بعد عن طريق الحاسب).

9. مفتاح t_{LED} لضبط شدة إضاءة الثنائيات الضوئية يدوياً (يمكن التحكم به أيضاً عن بعد عن طريق الحاسب).

10. زوج من مقابس الأمان 4mm لتوصيل مغنطيس التثبيت.

11. دبوس لجعل الجهد عند مقبسي الأمان في المجال 15-16 V.

12. وصلة بينية تسلسلية بتسعة دبابيس لوصل الحاسب بالكبل المرفق (15).

13. محفظة للكاميرا.

يتوافر بالإضافة إلى كاميرا الفيديوكوم ملحقات أخرى.

14. قضيب حامل طوله 107mm

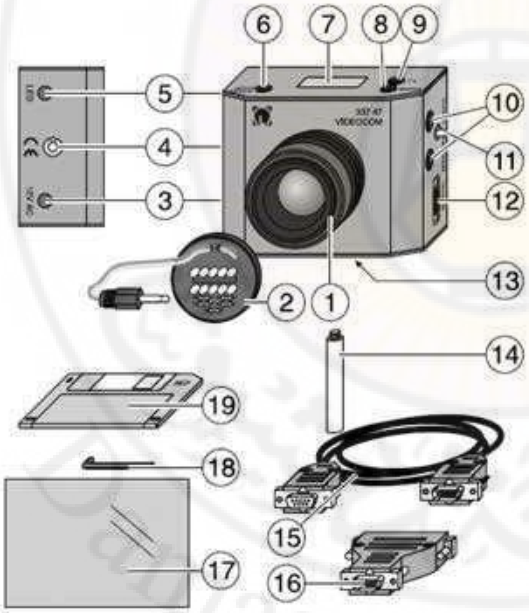
15. كبل تسلسلي

16. مأخذ موافق من 25-9 نقطة.

17. رقاقة انعكاس خلفي ذاتية الالتصاق على صفيحة قياس A5.

18. مفتاح Allan قطره 1.5mm لتثبيت براغي العدسات.

19. قرص مرن عليه برنامج كاميرا الفيديوكوم على ويندوز 95 أو NT.



الشكل8. أجزاء الكاميرا فيديوكوم

مبدأ القياس. لتسجيل الحركات يتم وضع لصاقة خلفية الانعكاس على جسم أو أكثر من الأجسام المتحركة، وتقوم كاميرا الفيديوكوم بالتعرف على الضوء الصادر عن الثنائيات الضوئية والمنعكس عن سطح اللصاقة، ومن ثم تقوم بإسنادها إلى المواضع الفعلية للأجسام. يمكننا باستخدام كاميرا الفيديوكوم إجراء الكثير من التجارب

على الحركات الخطية بتكرار هذه الخطوة ضمن فترات زمنية بالاعتماد على التجهيزات المتوافرة.

لإجراء قياسات الشدة النسبية للضوء تقوم الفيديوكوم بتحويل توزع الشدة الضوئية إلى قيم سطوع نسبية بمقدرة فاصلة ثمانية البتة.

يتم إجراء القياسات وتقويمها باستخدام البرنامج الذي تنفذه التوابع المرافقة.

المعطيات التقنية

- عدد عناصر الصورة الحساسة للضوء 2048
- البعد المحرقي للعدسة: 50mm
- زمن التعرض: $s(1/800)$ (ثابت)
- زمن وميض الثنائيات الضوئية: من $s(1/8000)$ إلى $s(1/800)$ (يمكن التحكم به آلياً ويدوياً).
- الشدة العظمى لضوء الخلفية التي يسمح بها في قياسات المسار: نحو 10% (ومِنْ ثَمَّ لا تكون قياسات المسار ممكنة في حالة خلفية مضاءة أو خارج المختبرات).
- المقدرة الفاصلة في قياس المسار: نحو 1/4000m أي ما يوافق 0.25mm عندما يكون طول المسار 1m ويقع على بعد 2m من الكاميرا.
- أطول مسار يمكن رصده: تقدر القيمة النموذجية بنحو 2.5m (الأطوال الأكبر ممكنة في حالة الخلفيات العاتمة وعدسة الكاميرا مفتوحة).
- عدد الأجسام التي يمكن رصدها في الوقت نفسه: العدد الأعظمي10.
- المقدرة الفاصلة الزمنية العظمى: 80 صورة في الثانية في الحالة التي لا يزيد فيها عدد الأجسام التي يتم رصدها عن اثنين.
- التبعثر في قياسات الشدة: أقل من $\pm 1\%$.
- كمون مغنطيس التثبيت: يمكن تعديله إلى نحو 16V ويمكن وصله وقطعه من خلال برنامج تحكم، مقاومة اللازمة للمغنطيس أكبر أو تساوي Ω 80، وهي مزودة بحماية في حالة الحمولة الزائدة للتيار.
- الوصل بالحاسب: عن طريق وصلة بينية تسلسلية.

- الوصل الكهربائي: 12V AC.
- أبعادها (عرض وارتفاع وعمق): $130mm \times 105mm \times 110mm$ فيها عدسة.
- كتلتها : نحو $0.6kg$.

B. صفيحة الانعكاس الخلفي

إن صفيحة الانعكاس الخلفي ذاتية الالتصاق، تعكس الضوء الوارد بدقة على نفسها (مبدأ المرايا الثلاث) ، يمكن لكاميرا الفيديوكوم أن تميز الضوء المنعكس عن إضاءة الخلفية من خلال قياس شدته والاعتماد عليه في تعيين موضع الصفيحة (الشكل5).

وتعد الثنائيات الضوئية المثبتة على الكاميرا عاملاً مهماً كمنبع للضوء. حيث تعكس الصفيحة الضوء لتعيده إليها تماماً.

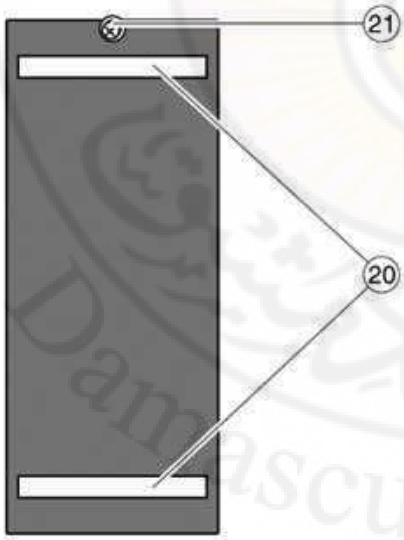
أبعاد االصفيحة: نحو $150mm \times 210mm$ أي $A5 \sim$.

C. الجسم الساقط الفيديوكوم (انظر الشكل3).

20. تضم اللوحة المستخدمة في تجربة السقوط الحر شريطين من صفيحة الانعكاس الخلفي، البعد بينهما نحو $200mm \pm 0.2mm$.

ملحوظة: الشريحتان تجعلان من السهل معايرة المسار من أجل قياس ما وفي حال الرغبة. تجعل الصورة البصرية خطية على CCD.

21. حامل لتعليق مغنطيس التثبيت.



الشكل3: الجسم الساقط الفيديوكوم

3. تشغيل كاميرا الفيديوكوم

A. الشروع بتشغيل الكاميرا

- **متطلبات إضافية**

وحدة تغذية 12VAC بقابس كهربائي ومقبس كهربائي، ومنصب ثلاثي القوائم للكاميرا. مغنطيس تثبيت لمزامنة بدء الحركة مع القياس. حاسب مزود بالويندوز 95 أو NT فما فوق.

- قم بتنصيب برنامج كاميرا الفيديوكوم (انظر الفقرة D) قبل استخدامها.

- استخدم دائماً كاميرا الفيديوكوم مع الفلاش (2) في تجارب الحركة.
- الصق شريحة من الصفيحة ذاتية الانعكاس(17) إلى الجسم المتحرك في التجربة لتسجيل حركاته (انظر الفقرة C).
- صل كاميرا الفيديوكوم إلى السطح البيني التسلسلي وابدأ بتشغيلها بوصلها إلى منبع التغذية.

ملحوظة. يصدر البرنامج رسالة خطأ عندما لا تكون الكاميرا موصولة بشكل صحيح.

- قم بضبط ومعايرة كاميرا الفيديوكوم (الفقرتان1 و2 من B) ومن ثم قم بتسجيل بعض القياسات وقم بتقويمها لاحقاً.

B. كاميرا الفيديوكوم

يمكن أن تعمل كاميرا الفيديوكوم وفق نمطي عمل أساسيين (تسجيل الحركة وقياس الشدة الضوئية)، كل منهما مزود بمجموعة من التوابع (فواصل زمنية مختلفة لتسجيل الحركات واختيار عدد عناصر الصورة في تمثيل الشدات الضوئية المقيسة).

تتم الإشارة إلى نمط العمل الحالي على شاشة العرض المحضرة من البلورات السائلة (7)، أما زر النمط mode (8) فيقوم بالتبديل بين نمطي العمل على التعاقب.

يتم التحكم بمدة إضاءة الثنائيات الضوئية على الكاميرا التي تظهر على شاشتها (7)، بشكل آلي لدى استخدامها في قياس المواضع.

يمكن ضبط مدة إضاءة الثنائيات الضوئية بشكل يدوي أيضاً باستخدام المفتاح t_{LED}. يظل الضبط اليدوي ساري المفعول إلى أن تتم إعادة تفعيل النمط الآلي باستخدام مفتاح النمط (8).

يتحكم مفتاح بدء تشغيل الكاميرا وإيقافها (6) بتسجيل القيم المقيسة في الحاسب الموصول بالكاميرا؛ فهو يقوم بالتبديل بين وصل المغنطيس وفصله في أثناء تسجيل الحركة.

يمكن التحكم بجميع وظائف تشغيل كاميرا الفيديوكوم المذكورة أعلاه بشكل كامل من خلال البرنامج.

1. ضبط الفيديوكوم لتسجيل الحركات

عندما يراد تسجيل الحركات (انظر الشكل4) فإن الكاميرا تبحث عن انعكاسات صفيحة الانعكاس الخلفي (انظر الفقرة C). وعندما يتم الكشف عن هذه الانعكاسات يجري عرض كل

من عددها والنسب المئوية لعروضها العظمى كنسبة مئوية ومواضعها على شاشة الكاميرا (7). يجب وضع *f-Stop* في العدسة عند أصغر قيمة، ويضبط محرق عدسات إلى اللانهاية (هذا عادة يكون كافياً بسبب كبر عمق التبئير). وقد أثبتت الطريقة التالية فعالية أكبر في الضبط.



الشكل4. الوسطاء الضوئية لكاميرا الفيديوكوم التي تشكل خيالاً على بعد 50mm لجسم متحرك على بعد قدره 2m من الكاميرا. يمكن في هذه الحالة تعقب مسار حركة طوله 1.1m. تتألف الحساسات الإلكترونية CCD المستخدمة في كشف الضوء المنعكس من 2048 بكسيل (عنصر صورة). ومِنْ ثَمَّ يقع إحداثيا حافتي الجسم اليسرى L واليمنى R بين 0 و 2000 عنصر صورة، وهذا يقابل مقدرة فاصلة مكانية تقدر بنحو 0.5mm. يمكن القول إن المقدرة الفاصلة لموضع الجسم تساوي القيمة المذكورة أعلاه إذا كان المجموع L + R الذي يقع بين الصفر و4000 عنصر صورة مقياساً لنقطة منتصف الجسم.

الحركة الأفقية

- قم بتحديد موقعي كل انعكاس (من أصل اثنين) عند حافتي مجال الحركة اليسرى واليمنى (وفي حال انعكاس وحيد لا بد من إعادة الخطوات التالية).
- قم بإعداد كاميرا الفيديوكوم بالنظر بحيث توازي حركة الجسم.
- اجعل كاميرا الفيديوكوم على بعد من الحركة يقدر بضعف طول المسار (طول مسار الحركة).
- اضبط ارتفاع الكاميرا بحيث يظهر انعكاس واحد على الأقل على شاشة الكاميرا (7).
- يمكن أن يقع الانعكاس الثاني خارج مجال الرؤية، (قم بزيادة المسافة) أو فوق خط البصر أو تحته (قم بإمالة الكاميرا جانبياً).

- أخيراً يجب أن يظهر الانعكاسان بوضوح عند حافتي شاشة الكاميرا اليمنى واليسرى (انظر الشكل5) بحيث لا تؤثر فيهما التغييرات البسيطة في الضبط.

- قم بضبط أبعاد عناصر الصورة (pixel) من خلال تحديد مواقع الانعكاسين على طول المسار (ضمن البرنامج).

الحركة العمودية (السقوط الحر)

- علق الجسم الساقط بحيث يتدلى من مغنطيس التثبيت، باستخدام دبوس الضبط (11)، اجعل كمون مغنطيس التثبيت (10) أخفض ما يمكن بحيث يتزامن عملياً بدء القياس والسقوط الحر.

- قم بتسديد كاميرا الفيديوكوم شاقولياً باستخدام ميزان التسوية (4).

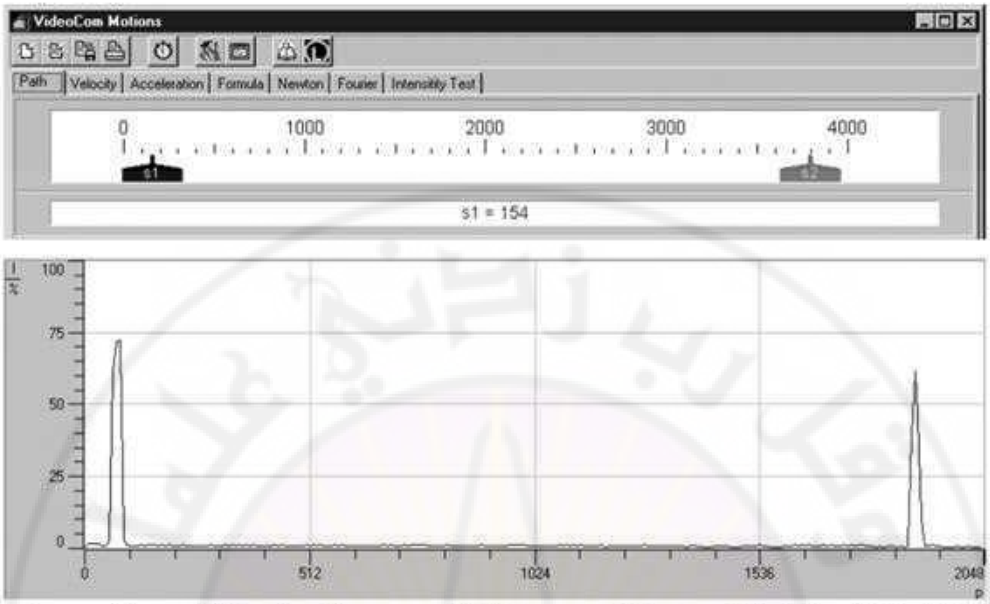
- اجعل الكاميرا على بعد من الجسم الساقط يساوي ضعف ارتفاع السقوط.

- قم بإعداد الكاميرا بحيث يظهر الانعكاسان بوضوح في المجال العلوي من شاشة الكاميرا (7).

- قم بضبط بعد عنصر الصورة بتعيين موقعي الانعكاسين عند 0m و 0.2m (في البرنامج).

ملحوظة: إذا لم يكن من الممكن ضبط كاميرا الفيديوكوم بسبب الكشف عن عدد قليل جداً أو كبير جداً من الانعكاسات (بسبب شروط الإضاءة غير المناسبة مثلاً) فإن برنامج تقويم الحركات يسمح لك بعرض شدات الضوء المقيسة (اختبار الشدة). يتميز التوزع النموذجي للشدة بنهاية عظمى يقدر اتساعها بنحو 25% على الأقل ولا تزيد شدة الخلفية على 10% في كل انعكاس (الشكل5).

ليس هناك أي تأثير للقطع المعدنية العارية الواقعة في مجال الكاميرا عندما لا تعكس الضوء مباشرة إليها. فإذا حدثت هذه المشكلة فإنه يمكن حلها بتغيير ارتفاع الكاميرا ومِنْ ثَمَّ زاوية ورود الضوء عليها.



الشكل5. تكشف الكاميرا المسددة بشكل صحيح الانعكاسين عند حافتي الحركة اليسرى واليمنى حتى عند حافة الـ CCD (يظهر في الأعلى تسجيل للحركة وفي الأسفل لشدة الضوء) في هذا المثال. تقل شدة الخلفية في هذا المثال عن 10% وتزيد شدة الانعكاسين على 25%. يستخدم موقعا الحافتين اليسرى واليمنى للانعكاس في تعيين إحداثيي عناصر الصورة المعروضة. يكفي في المعايرات اللاحقة مثلاً تحديد المسافة بين الانعكاسين.

2. ضبط كاميرا الفيديوكوم لقياس الشدات الضوئية

يمكن استخدام كاميرا الفيديوكوم على جسر ضوئي في إجراء التجارب الضوئية بالاستعانة بالقضيب الحامل المرفق مع التجهيزات. وبحسب التجربة يمكن فك العدسة باستخدام البراغي السداسية (18). عندما يتم تبديل نمط عمل كاميرا الفيديوكوم إلى قياس الشدة من خلال البرنامج أو مفتاح النمط (8) يدل الخط السفلي على شاشة الكاميرا (7) يدل على توزع الشدة المقيسة.

للحصول على نتائج تجريبية مرضية يجب ضبط محوري التسديد الضوئي بعناية. تبدأ هذه العملية بدءاً من منبع الضوء إلى اليسار وكاميرا الفيديوكوم إلى اليمين. يجب أن يتم تسديد المنبع الضوئي (الليزر) وكاميرا الفيديوكوم بحيث يقعا على المحور الضوئي بدقة. يجري إعداد المكونات الباقية بدءاً من اليسار إلى اليمين مع الانتباه إلى عدم تغير المحور الضوئي. يحتاج الأمر أيضاً للتأكد من أن مسار الحزمة متوازٍ قدر الإمكان أمام هدف (جسم) الانعراج.

ملحوظة. إن كاميرا الفيديوكوم لا تقيس إلّا الشدات الضوئية الواقعة على خط واحد. أما الضوء الذي يعبر العدسة وفق قطرها فلا يسقط على صف الحساسات الإلكترونية CCD للضوء.

3. التداخل في قياسات الشدة

تنشأ مشكلة التداخل من حيث المبدأ عندما تجرى القياسات باستخدام الضوء المترابط. يحدث لدى استخدام كاميرا الفيديوكوم نوعان من التداخل:

- ضوء الليزر يعبر العدسات والنافذة الزجاجية للحساسات الضوئية CCD.

يمكن لكل من ضوء الليزر المنتثر والمنعكس أن يحدث تداخلات بناءة وأخرى هدامة لكبر طول ترابط ضوء الليزر. هذا ولا تصل ترنحات الشدة الناتجة إلى أكثر من 5% كحد أعلى(انظر الشكل6 إلى اليسار). ليس لهذا الضوء المنتثر أي دور مهم، لدى تقسيم توزع شدة ضوء الانعراج عند حافة مستوٍ على توزع الضوء غير المنعرج (الشكل6 إلى اليمين). عند قياس شدات الانعراج على شق أو عدة شقوق فإنه يمكن لهذه التغيرات في الشدة أن تتداخل مع القياس.

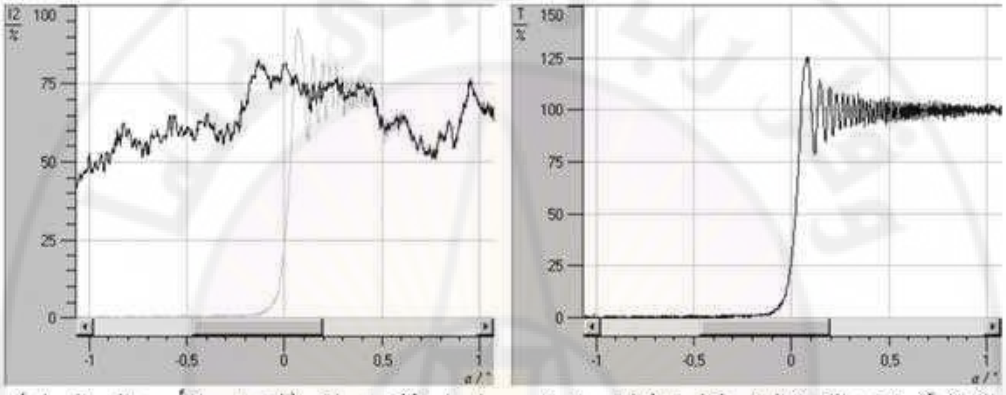
- يسقط الضوء المترابط من مختلف الأطوال الموجية على عناصر صورة مختلفة (pixels) في الحساسات الضوئية CCD.

تقع طبقة إضافية بين سطح الحساسات الإلكترونية CCD والطبقة الحساسة للضوء، تقدر سماكتها بنحو عدة مكرومترات. يؤدي التداخل الذي يحدث في هذه الطبقة أيضاً على تغيير الشدة الواردة على الطبقة الحساسة للضوء. يتعلق هذا التغير بطول موجة الضوء، وهو أمر واضح في توزع الشدة المقيسة في مرتبة الانعراج الأولى عند شبكة الانعراج (الشكل7 إلى اليسار). ليس لظاهرة التداخل في هذه الحالة أيضاً أي أثر واضح لدى تقسيم توزع شدة الضوء المرشحة إلى توزع الشدة غير المرشحة (انظر الشكل 7 إلى اليسار).

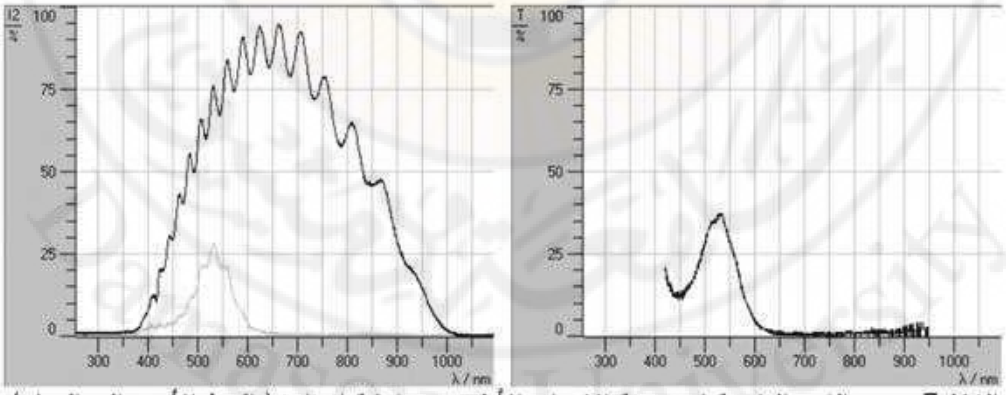
c. الصفيحة الخلفية الانعكاس

يمكن قص شرائط ذاتية الالتصاق ولصقها بسهولة على الكثير من الأجسام المتحركة (لفها حول جسم متحرك أو قضيب يهتز) للسماح بتسجيل حركتها.

لا يمكن الحصول على نتائج قياس جيدة إلّا باستخدام رقائق نظيفة وغير مخدوشة. يجب ألّا تكون الشرائح صغيرة جداً. كما يجب أن يبلغ عرض الشريحة نحو 0.5 إلى1% من طول المسار الكلي. ويعدّ ارتفاع الشريحة عاملاً مهماً في ضبط كاميرا الفيديوكوم بشكل موثوق. ويجب ألّا يقل عن 5% من طول المسار. وبقدر ما يكون ارتفاع الشريط أعلى يكون كشف الكاميرا الفيديوكوم للانعكاس أسهل وأن تصور الانعكاسات عند حافتي الصورة اليسرى واليمنى للصورة بشكل متزامن، أي تتبع الانعكاسات في كامل مجال الحركة.



الشكل6. توزع الشدة المقيسة لحزمة ليزر تم توسيعها بواسطة عدسات (المنحني الأسود إلى اليسار)، وتوزع الشدة النسبي الموافق بعد الانعراج عند حافة مستوٍ (يظهر في الطرف الأيمن نسبة المنحني الرمادي إلى اليسار على المنحني الأسود)



الشكل7. توزع الشدة المقيسة في مرتبة الانعراج الأولى عند شبكة انعراج (الخط الأسود إلى اليسار) ، يظهر إلى اليمين توزع الشدة النسبية الموافق خلف مرشح أخضر (منحني مرشح بالنفوذ) وينتج عن حاصل قسمة المنحني الرمادي إلى اليسار على المنحني الأسود.

d. البرنامج

تنصيب البرنامج يحتاج إلى حاسب مزود بويندوز 95 أو NT بشكل جيد.
يجري التنصيب بتنفيذ الملف setup.exe من القرص بعد تحديد اللغة وإدارة التنصيب.
يمكن بعد تنصيب البرنامج ملاحظة وجود كلمتي حركات motions وشدات intensities في قائمة ابدأ Software → videocom .
إذا لم يتمكن البرنامج من العثور على كاميرا الفيديوكوم لدى البدء فإنه يرسل رسالة خطأ (والأسباب الممكنة: منبع الكمون أو الكابل التسلسلي غير موصولين بشكل جيد أو سطح بيني تسلسلي خاطئ).
يمكن تغيير هذا الأخير بالضغط على F5، (مربع الحوار tab General → setup ومن ثم يمكن حفظ الإعدادات الجديدة ، يمكن إزالة البرنامج في أي وقت باستخدام لوحة التحكم في الحاسوب.
كلا البرنامجين يتضمنان لوائح مساعدة تفصيلية لاستخدام جميع التوابع، يمكن الولوج إلى هذه المساعدة بالضغط علىF1 بعد تشغيل البرنامج المطلوب ويمكن طباعة ملفات المساعدة في حال الرغبة. تتضمن ملفات المساعدة الكثير من الملاحظات التجريبية والإشارات المفيدة.

التجربة (11)

الدارات الكهربائية المترابطة بالسعة

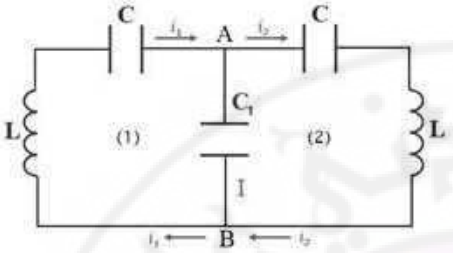
1. هدف التجربة

دراسة الاهتزازات القسرية لدارتين كهربائيتين مترابطتين بالسعة وتحديد حالتي التجاوب والتجاوب المضاد، ومراقبتها على شاشة راسم اهتزاز مهبطي أو مقياس فولط.

2. التمهيد النظري

1.2. الاهتزازات الحرة للدارة الكهربائية المترابطة بالسعة

تتألف الدارة الكهربائية المترابطة بالسعة من دارتين مهتزتين متماثلتين مترابطتين بسعة مشتركة الشكل1.



الشكل1

لدينا وفق قواعد تحليل الدارات على العروة اليسرى والعروة اليمنى:

$$V_A - V_B = \frac{1}{C_1}\int I\,dt$$

$$= -L\frac{di_1}{dt} - \frac{1}{C}\int i_1 dt \quad (1)$$

$$= L\frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C}\int i_2\,dt$$

(2) وكذلك $I = i_1 - i_2$

حيث: $i_1 = \frac{dq_1}{dt}$ و $i_2 = \frac{dq_2}{dt}$

نحصل من العلاقتين السابقتين على المعادلتين التفاضليتين التاليتين:

$$L\frac{d^2q_1}{dt^2} + \frac{1}{C}q_1 - \frac{1}{C_1}(q_2 - q_1) = 0 \quad (3)$$

$$L\frac{d^2q_2}{dt^2} + \frac{1}{C}q_2 - \frac{1}{C_1}(q_1 - q_2) = 0 \quad (4)$$

لنلاحظ هنا التشابه الواضح بين هاتين المعادلتين التفاضليتين والمعادلتين التفاضليتين (7) و(8) في تجربة "النواسان المترابطان" (التجربة العاشرة).

إذاً لحل هاتين المعادلتين نتبع الخطوات نفسها كما في تجربة النواس المترابط فنجد التواترين النظاميين:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (5)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{C_1 + 2C}{LC_1C}} \quad (6)$$

ومِنْ ثَمَّ يكتب الحل العام على الصورة التالية:

$$q_1(t) =$$

$$= \frac{1}{2}\begin{pmatrix} a_1\cos\omega_1 t + b_1\sin\omega_1 t \\ + a_2\cos\omega_2 t + b_2\sin\omega_2 t \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$q_2(t) = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} a_1\cos\omega_1 t + b_1 \sin\omega_1 t \\ -a_2\cos\omega_2 t - b_2\sin\omega_2 t \end{pmatrix} \quad (8)$$

قارن هاتين المعادلتين بالمعادلتين (23) و(24) في تجربة النواسين المترابطين.

مناقشة الحل العام

في الحل العام تكون الثوابت a_1 و a_2 و b_1 و b_2 مجهولة وتتعين من خلال الشروط الابتدائية لاهتزاز الدارة المترابطة، وهنا أيضاً سنقتصر دراستنا على حالات ثلاث:

❶ الاهتزاز على التوافق

في هذه الحالة تكون الشروط الابتدائية على النحو التالي:

$$q_1(0) = q_2(0) = q_0$$
$$(dq_1/dt)_{t=0} = (dq_2/dt)_{t=0} = 0$$

أي إن المكثفتين C كانتا في لحظة البدء $t = 0$ مشحونتين بالشحنة نفسها q_0 في تلك اللحظة: $i_1(0) = i_2(0) = 0$

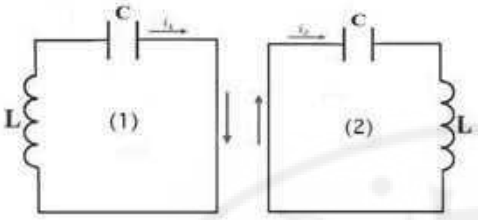
نجد وفق هذه الشروط أن: $a_1 = 2q_0$ و $a_2 = 0$ و $b_1 = b_2 = 0$ ، ومنه:

$$q_1(t) = q_2(t) = q_0\cos\omega_1 t \quad (9)$$

ومِنْ ثَمَّ:

$$i_1(t) = i_2(t) \quad (10)$$

إذاً لا يمر تيار في المكثفة C_1، وهذا يعني أن الدارة المترابطة تهتز بالتواتر ω_1 كما لو أن لدينا دارتين مستقلتين ومكثفة الترابط غير موجودة (الشكل2).



الشكل2. الاهتزاز على التوافق

❷ الاهتزاز على التعاكس

نشحن في هذه الحالة المكثفة C_1، وفي لحظة البدء $(t = 0)$نفرغها في الدارتين (1) و(2): هذا الشرط الابتدائي يكافئ تماماً شحن المكثفتين C في اللحظة الابتدائية بالشحنة q_0 نفسها، ولكن باستقطابين متعاكسين، أي إن:

$$q_1(0) = -q_2(0) = q_0$$
$$i_1(0) = i_2(0) = 0 \quad \text{و}$$

نجد وفق هذه الشروط الابتدائية أن:

$a_1 = 0$ و $a_2 = 2q_0$ و $b_1 = b_2 = 0$ ، ومنه:

$$q_1(t) = -q_2(t) = q_0\cos\omega_2 t \quad (11)$$

ومِنْ ثَمَّ:

$$i_1(t) = -i_2(t) \quad (12)$$

أي إن اهتزازتي التيارين i_1 و i_2 متعاكستان في الطور.

لنلْحَظ هنا أنه إذا كانت شحنة المكثفة C_1 في البدء هي Q، فإنه يمر في الدارة (1) الشحنة $Q/2$ فتهتز هذه الدارة كما لو أنها مستقلة، وهي تحتوي، بالإضافة إلى الملف L، على مكثفتين C و $C_1/2$ على التسلسل، سعتهما

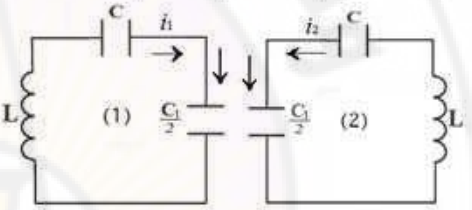
المكافئة هي:

$$C' = \frac{C\,C_1}{C_1 + 2C}$$

ويمكن التعبير عن تواتر اهتزاز هذه الدارة بالعلاقة:

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{C_1 + 2C}{LC_1C}}$$

كما تهتز الدارة (2) بالتواتر ω_2 نفسه، إنما على تعاكس في الطور (الشكل3).



الشكل3. الاهتزاز على التعاكس

❸ الاهتزاز المترابط (الخفقان)

في هذه الحالة نشحن إحدى المكثفتين C ولتكن الأولى مثلاً بالشحنة q_0 ومن ثم نغلق الدارتين معاً في اللحظة $t = 0$ فيكون:

$$q_1(0) = q_0 \quad \text{و} \quad q_2(0) = 0$$

$$\text{و} \quad i_1(0) = i_2(0) = 0$$

نجد في هذه الشروط أن $a_1 = a_2 = q_0$ و $b_1 = b_2 = 0$، ومنه:

$$q_1(t) = (q_0/2)(\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t)$$

$$q_2(t) = (q_0/2)(\cos\omega_1 t - \cos\omega_2 t)$$

أو:

$$q_1(t) = q_0\left(\cos\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\,\cos\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right) \quad (15)$$

$$q_2(t) = q_0\left(\sin\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\sin\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right) \quad (16)$$

قارن هاتين العلاقتين بالعلاقتين (31) و (32) في النواس المترابط.

نلاحظ في هذه الحالة أن شحنة المكثفة C في الدارة الأولى تتناقص بسرعة مع الزمن بينما يبدأ شحن المكثفة C في الدارة الثانية، وهكذا تنتقل الطاقة بين الدارتين ذهاباً وإياباً.

درجة الترابط

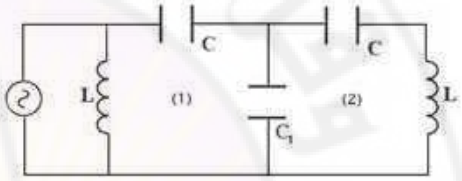
تعرف درجة الترابط هنا كما في حالة النواس المترابط بالنسبة:

$$\chi = \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C}} = \frac{C}{C_1 + C} \quad (17)$$

وهي تمثل نسبة أمثال المتحول الثاني (q_2 في العلاقة (3)) إلى أمثال المتحول الأول (q_1 في العلاقة (3)) في المعادلة الخاصة بكل متحول.

2.2. الاهتـزازات القسـرية للـدارة الكهربائيـة المترابطة بالسعة

يطلق اسم الدارة الأولية على الدارة التي تطبـق عليهـا الاهتـزازة الخارجيـة $V = V_0 \cos\theta$. ويطلـق اسـم الـدارة الثانويـة علـى الـدارة التـي لا تخضـع مباشـرةً إلـى الاهتزازة الخارجية (الشكل4).



الشكل4

يمكن التعبير عن معادلتي الاهتزاز في كل من الدارتين على الترتيب بالشكل:

$$L\frac{d^2q_1}{dt^2}+\frac{1}{C}q_1-\frac{1}{C_1}(q_2-q_1) = V_0\cos\omega t \quad (18)$$

$$L\frac{d^2q_2}{dt^2}+\frac{1}{C}q_2-\frac{1}{C_1}(q_1-q_2)=0 \quad (19)$$

ولدينا ω_1 و ω_2 التواتران الأساسيان للجملة الحرة:

$$\omega_1=\sqrt{\frac{1}{LC}} \text{ و } \omega_2=\sqrt{\frac{C_1+2C}{LC_1C}} \quad (20)$$

نجرّب حلاً للمعادلتين (18) و(19)، من أجل q_1 و q_2 في حالة النظام المستتب من الشكل:

$$q_1 = Q_1\cos\omega t \quad (21)$$

$$q_2 = Q_2\cos\omega t \quad (22)$$

وبالتعويض في المعادلتين المذكورتين نحصل:

$$L\left(-\omega^2 Q_1\right)\cos\omega t+\frac{1}{C}Q_1\cos\omega t$$

$$-\frac{1}{C_1}\left(Q_2-Q_1\right)\cos\omega t = V_0\cos\omega t$$

$$L\left(-\omega^2 Q_2\right)\cos\omega t+\frac{1}{C}Q_1\cos\omega t$$

$$-\frac{1}{C_1}\left(Q_1-Q_2\right)\cos\omega t = 0$$

وبعد اختصار الحد $\cos\omega t$ نجد:

$$\left(-L\omega^2+1/C+1/C_1\right)Q_1-\frac{1}{C_1}Q_2=V_0 \quad (23)$$

$$\left(-L\omega^2+1/C+1/C_1\right)Q_2-\frac{1}{C_1}Q_1=0 \quad (24)$$

من المعادلة (24) نجد:

$$Q_2=\frac{(Q_1/C_1)}{\left(-L\omega^2+\frac{1}{C}+\frac{1}{C_1}\right)} \quad (24)'$$

وبفـرض أن $-L\omega^2+\frac{1}{C}+\frac{1}{C_1}\neq 0$ فـي العلاقـة '(24) وتعـويض هـذه الأخيـرة فـي المعادلة (23) نحصل على:

$$\left\{\left(-L\omega^2+\frac{1}{C}+\frac{1}{C_1}\right)-\frac{(1/C_1)^2}{\left(-L\omega^2+\frac{1}{C}+\frac{1}{C_1}\right)}\right\}Q_1=V_0$$

$$Q_1 = \frac{\left(-L\omega^2 + \frac{1}{C} + \frac{1}{C_1}\right)}{\left(-L\omega^2 + \frac{1}{C} + \frac{1}{C_1}\right)^2 - \left(\frac{1}{C_1}\right)^2} \quad V_0 \quad (25)$$

وفي الحالة التي يكون فيها:

$$\omega = \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L\,C}} \quad \text{أو}$$

$$\omega = \omega_2 = \sqrt{\frac{C_1 + 2C}{L\,C_1\,C}}$$

نجد أن $Q_1 = \infty$ وكذلك $Q_2 = \infty$ وهذه هي حالة التجاوب.

أما في الحالة $-L\omega^2 + \frac{1}{C} + \frac{1}{C_1} = 0$ أو

$$\omega = \Omega = \sqrt{\frac{C_1 + C}{L\,C_1\,C}} \quad (26)$$

فنجد من المعادلتين (23) و (24) أن:

$$Q_1 = 0 \quad \text{و} \quad Q_2 = -C_1 V_0$$

وهي حالة التجاوب المضاد وهي الحالة التي لا تهتز فيها إلاّ الدارة الثانوية فقط.

وفي حال وجود مقاومات أومية في الدارتين المهتزتين يصبح كل من Q_1 و Q_2 كبيراً في كل من الحالتين: $\omega = \omega_1$ أو $\omega = \omega_2$ وتصبح Q_1 صغيرة عندما $\omega = \Omega$. وعندما تكون $\omega = 0$ يتناهى كل من Q_1 و Q_2 إلى قيمة محدودة. أما عندما $\omega \to \infty$ ينتهي كل من Q_1 و Q_2 إلى الصفر. ويبين الشكل5 تغيرات Q_1 بدلالة ω.

3. الأدوات والأجهزة

مولد اهتزاز جيبي من $200Hz$ إلى $200kHz$، راسم اهتزاز مهبطي بقناتين، مقياس فولت متناوب، مكثفتان $C = 0.1\mu F$، ملفان متماثلان، التحريضية الذاتية لكل منهما نحو $20mH$، مكثفتان سعة الأولى $1\mu F$ وسعة الثانية $0.47\mu F$.

4. طريقة العمل

1. قم بتوصيل الدارة الكهربائية المبينة في الشكل4، مع مراعاة وصل المربط الأرضي للمولد بالنقطة السفلية على الشكل ليشكل الخط السفلي للدارة المربط الأرضي لها وللتمكن بسهولة ويسر من قياس التوتر الكهربائي بين طرفي كل من الملفين باستخدام قناتي راسم الاهتزاز ومراقبة تطور الإشارة التي تمر في كل منهما مع التغيير التدريجي لتواتر المنبع. حيث $C = 1\mu F$ وقس فرق الكمون V بين طرفي ملف الدارة الأولية مع تغيير تواتر الاهتزازة المطبقة بشكل تدريجي راصداً تطورها بوصل كل من ملفي الدارة بإحدى قناتي الراسم مراعياً وصل أرضي الراسم بالطرف السفلي من الملف.

2. كرر الخطوات السابقة في حالة المكثفة الثانية $C_1 = 0.47\mu F$ ثم في حالة وصل

المكثفتين السابقتين مرة على التسلسل ومرة على التوازي.

3. قس طول ضلع الوشيعة لحساب كل من مساحة سطحها وطول السلك بمعرفة عدد اللفات المسجل على الوشيعة.

5. تحليل النتائج التجريبية

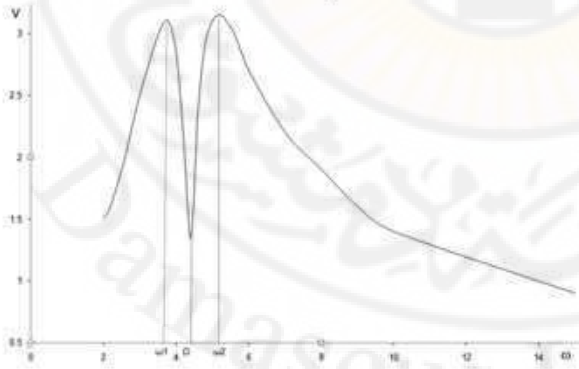
1. ارسم المنحنيات البيانية الأربعة لتغيرات V بدلالة ω (على النحو المبين في الشكل5) وفق القيم الأربع المذكورة أعلاه لـ C_1 كلاً على ورقة ملمترية واحدة. حدد على هذه المنحنيات قيم التواترين النظاميين ω_1 و ω_2 وكذلك تواتر التجاوب المضاد Ω، واحسب درجة الترابط χ في كل مرة وفق العلاقة (17) في الحالات الأربع.

2. قارن بين قيم ω_1 و ω_2 المحسوبة وفق العلاقتين (20) وقيمها المقيسة من المنحنيات. وكذلك قارن قيم Ω المحسوبة من العلاقة (26) بقيمها المقيسة.

3. تحقق من انعدام التيار الذي يمر في المكثفة C_1 عندما يكون تواتر المولد $\omega = \omega_1$ أي في حالة الاهتزاز على التوافق، وذلك إما بوضع مقياس أمبير على التسلسل مع المكثفة C_1 أو بقياس فرق الكمون بين طرفي هذه الأخيرة، حيث يكون فرق الكمون أيضاً معدوماً في هذه الحالة.

4. احسب ذاتية الوشيعة من علاقتها المعروفة وقدّر الارتياب في نتيجة القياس.

5. ارسم المنحني البياني لتغيرات $\omega_2^2 (= \frac{1}{LC} + \frac{2}{LC_1})$ بدلالة $1/C_1$ واستنتج منه قيمة كل من L و ω_1^2 قارن قيمة ω_1^2 هذه مع القيمة المقاسة وفق الطلب3. وكذلك قارن قيمة L المستنتجة بقيمتها المحسوبة في الطلب السابق.



الشكل5

التجربة (12)

الدارات الكهربائية المهتزة والدارات المترابطة تحريضياً

1. هدف التجربة

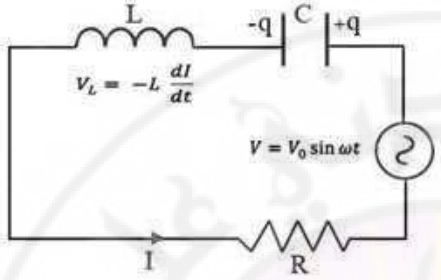
1. تعيين عامل الجودة Q لدارة مهتزة بالاعتماد على عرض عصابتها.
2. تعيين كل من عامل جودة الدارة المهتزة بالاعتماد على تواتر التجاوب ω_0 والسعة C_{tot} والناقلية على التوازي G_p التي يتم تعيينها بطريقة باولي، وعامل تبديد الدارة المهتزة الحرج δ_{crit} (أي المثالي).
3. تعيين عامل الترابط χ بين دارتين تتأثران عن طريق ملفين وتغير عرض عصابة مرشح التمرير العصابي Δf بدلالة البعد بين الملفين.

2. المبدأ النظري

1. تحديد عامل جودة دارة مهتزة

تتكون الدارة المهتزة البسيطة من تحريضية L ومكثفة C، يمكن أن توصلا:

a) إما على التسلسل (الشكل1) فيحدث التجاوب عند التواتر ω_0 (الذي يحقق العلاقة $\omega_0 C = 1/\omega_0 L$) والذي تكون ممانعة الدارة عنده في قيمتها الصغرى، وتتكون من مقاومة صرفة (حيث ينعدم الجزء التخيلي من الممانعة)، وتدخل



الشكل1. مكثفة وتحريضية على التسلسل

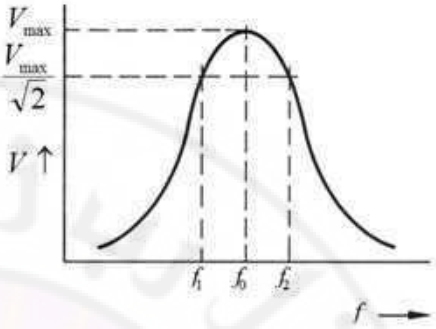
مقاومة التحريضية ضمن هذه المقاومة. وعندما تغذى هذه الدارة بمنبع تيار متناوب متغير التواتر يظهر التجاوب واضحاً كما في الشكل2 حيث:

$$V_C = I/(j\omega_0 C) = V/(j\omega_0 CR) \quad (1)$$

$$|V_C/V| = (\omega_0 CR)^{-1} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega_0 L}{R} = Q \quad (2)$$

حيث تعرّف النسبة Q عامل جودة الدارة، الذي يدعى أحياناً عامل تضخيم الدارة؛ يكون هذا العامل عادة كبيراً لارتفاع تواتر التجاوب وكبر تحريضية الملف مقارنةً بمقاومته الأومية. يمكن ملاحظة تناظر المنحني إلى جانبي تواتر التجاوب وبالقرب منه. وإن عامل الجودة Q هو الذي يحدد عرض مجال التجاوب، حيث يحدد تواترين f_1 و f_2 ينخفض كمون التجاوب عندهما بمقدار $\sqrt{2}$ أي:

$$Q = \omega_0 / \Delta\omega = f_0 / \Delta f = f_0 / (f_2 - f_1) \quad (3)$$



الشكل2. عرض عصابة الدارة المهتزة

b) على التوازي، يفضل في هذه الحالة التعامل مع قبولية الدارة admittance (مقلوب الممانعة) (الشكل3). يمكن التعبير عن قبولية الدارة المكافئة G_p (ناقلية التوازي) في هذه الحالة (الشكل4) بالعلاقة:

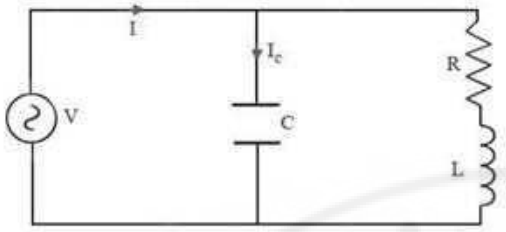
$$G_p = j\omega C + \frac{1}{R + j\omega L} = j\omega C + \frac{R - j\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (4)$$

يمكن أن نعرف تواتر تجاوب هذه الدارة ω_r بأنه التواتر الذي تكون قبولية الدارة عنده حقيقية أي ناقلية صرفة. تعطي مساواة الحدود التخيلية في العلاقة (4) للصفر:

$$R^2 + \omega_r^2 L^2 = L/C$$

ومن ثم:

$$\omega_r = \left(\frac{1}{LC}\right)^{1/2}\left(1 - \frac{R^2 C}{L}\right)^{1/2} = \left(\frac{1}{LC}\right)^{1/2}\left(1 - \frac{1}{Q^2}\right)^{1/2} \quad (5)$$



الشكل3. التحريضية والمكثفة على التوازي

حيث $\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - 1/Q^2}$

في حين تكون القبولية ناقلية صرفة عند هذه النقطة:

$$G_p = R/(R^2 + \omega^2 L^2) = RC/L = 1/(Q^2 R)$$

نلْحَظ أن تواتر التجاوب في حالة التوازي لا يساوي التواتر نفسه في حالة دارة التجاوب التسلسلية ولو أن الفارق صغير بين الحالتين ويمكن إهماله عادة إذا كان عامل الجودة كبيراً. يدعى مقلوب القبولية عند التجاوب "المقاومة على التوازي".

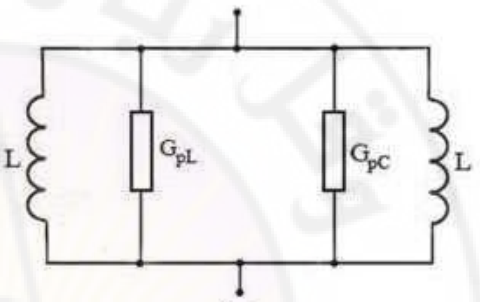
2. حساب عامل التبديد

يعرّف الملف المثالي بأنه الملف الذي تكون ممانعته تحريضية صرفة، ولو أن هذا الأمر غير محقق عملياً.

إذ لا بد أن يكون لسلك الملف مقاومة، ومِنْ ثَمَّ تتكون ممانعته من جزء حقيقي بالإضافة إلى الجزء التخيلي ويمكن التعبير عن ابتعاد الملف عن المثالية بالزاوية التي تصنعها ممانعته مع المحور التخيلي التي يعطى

ظلّها بـ $\tan\delta_{crit} = \frac{R}{\omega L}$. وفي حال كون الملف جزءاً من دارة يرتبط عامل تبديد الدارة بعامل جودتها في حالة التجاوب بالعلاقة التالية:

$$Q = (\tan\delta_{crit})^{-1} \qquad (6)$$



الشكل4. الدارة المكافئة لدارة التجاوب على التوازي

3. عامل الترابط بين دارتين مهتزتين مترابطتين تحريضياً

عندما تقع دارتان إحداهما في مجال الحقل المغنطيسي للأخرى، كما في الشكل5 ترتبط إحداهما بالأخرى بالتحريضية المتبادلة M بين ملفيهما L_1 و L_2. إن الكمون V_1 المطبق على الدارة الأولى يولد تياراً I_1، يحرض كموناً $M(di_1/dt)$ في الدارة الثانية. عندما يكون شكل موجة الكمون جيبياً بسيطاً فيمكن التعبير عنه بالشكل $j\omega MI_1$، حيث $j\omega M$ مؤثر ممانعة التحريضية المتبادلة. وبالمثل إذا كان I_2 التيار الذي يمر في الملف الثاني، فإنه يتحرض في الملف الأول الكمون.

ومِنْ ثَمَّ لدينا في حالة الدارتين:

$$\begin{aligned} V_1 &= I_1 Z_1 + j\omega M I_2 \\ 0 &= I_2 Z_2 + j\omega M I_1 \end{aligned} \qquad (7)$$

حيث Z_1 و Z_2 ممانعتا الدارتين الأولى والثانية على الترتيب ، حيث

$$M_{12} = \frac{N_1\Phi_{12}}{I_2} = \frac{N_2\Phi_{21}}{I_1} = M_{21} = M$$

بالتعويض عن I_2 في المعادلة الثانية بدلالة I_1 واستبداله في المعادلة الأولى نحصل على:

$$V_1 = I_1\left(Z_1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_2}\right) \qquad (8)$$

تدعى الكمية ω^2M^2/Z_2 بالممانعة المنعكسة نحو الدارة الأولى. وبالتعويض عن I_1 في المعادلة الأولى بدلالة I_2 واستبداله في المعادلة الثانية نجد:

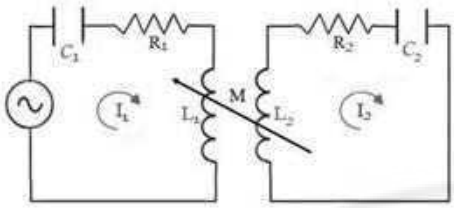
$$-\frac{j\omega M}{Z_1}V_1 = I_2\left(Z_2 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_1}\right) \qquad (9)$$

التي تدل على أن التيار في الدارة الثانية هو ينجم عن الكمون الظاهري

$$-(j\omega M/Z_1)V_1$$

الذي يعمل في Z_2 بالإضافة إلى الممانعة المنعكسة ω^2M^2/Z_1 نحو هذه الدارة.

يلْحَظُ أن التيار المار في كل من العناصر في حالة التسلسل هو نفسه وتجمع فروق الجهد بينما في الوصل على التفرع يكون فرق الجهد بين كل من العناصر هو نفسه وتجمع التيارات عمليا.



الشكل5. دارتا تجاوب مترابطتان بالتحريضية

لدراسة سلوك الدارة الأولى بتفصيل أكثر نكتب $Z_1 = R_1 + jX_1$ و $Z_2 = R_2 + jX_2$، ومِنْ ثَمَّ:

$$\frac{V_1}{I_1} = R_1 + jX_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + jX_2}$$

$$= R_1 + \frac{R_2\omega^2M^2}{(R_2^2 + X_2^2)} + j\left\{X_1 - \frac{X_2\omega^2M^2}{(R_2^2 + X_2^2)}\right\}$$

$$= R_p + jX_p \qquad (10)$$

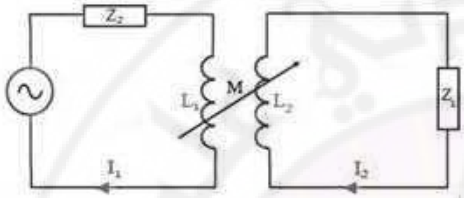
يكون الكمون والتيار في الدارة الأولى متطاورين عندما يكون $X_p = 0$. سنفرض في التحليل التالي بأن عناصر الدارتين متماثلة بحيث أن $R_1 = R_2$ و $X_1 = X_2$ عند جميع التواترات (يتطلب هذا الأخير أن يكون $L_1 = L_2$ و $C_1 = C_2$). ومِنْ ثَمَّ فإن

$$X_p = X\left(1 - \frac{\omega^2M^2}{R^2 + X^2}\right)$$ وتكون

$X_p = 0$ عندما يكون:

$X^2 = \omega^2M^2 - R^2$ أو $X = 0$ (11)

لا يمكن تحقيق الشرط الثاني إلاّ عندما يكون $\omega M > R$. إذا كان $\omega M = R$ تكون الجذور الثلاثة متطابقة، وإذا كان



الشكل6. شكل تخطيطي لمحول بحمولة Z_2

$\omega M < R$، فلا يوجد إلاّ جذر حقيقي واحد. تصبح دلالة هذه الجذور واضحة عندما ندرس سلوك التيار الثانوي. عندما يكون $X_1 = X_2 = X = 0$، نحصل من المعادلة (9):

$$I_2 = \frac{-j\omega_0 M V_1}{Z^2 + \omega_0^2 M^2} \qquad (12)$$

حيث $\omega_0 = (LC)^{-1/2}$ تواتر التجاوب الذاتي لكل من الدارتين. فإذا كنا نستطيع تغيير التحريضية المتبادلة M، ترتفع قيمة I_2 عند هذا التواتر مع تزايد M من الصفر، وتمر بنهاية عظمى تساوي $-jV_1/2R$ عندما $\omega_0 M = R$ ثم تهبط ثانية. إن الممانعة المنعكسة من الدارة الثانوية نحو الدارة الأولية تساوي بالضبط R عند النهاية العظمى، لتكون الدارة الثانوية في حالة تجاوب مع الدارة

الأولية، وتكون الاستطاعة المتبددة في الدارة الثانوية عظمى عند هذه النقطة. يمكن أن نرى من المعادلتين (8) و(12) أن كلاً من التيارين في الدارتين الأولية والثانوية يساوي $V_1/2R$ عند هذه النقطة ويختلفان في الطور بمقدار $\pi/2$. عند النقطتين الأخريين اللتين تعطيهما المعادلة (11)، حيث تكون الممانعة الفعالة للأولية حقيقية، يكون التيار الثانوي:

$$I_2 = \frac{-j\omega MV_1}{Z^2+\omega^2M^2}$$

$$= \frac{-j\omega MV_1}{R^2-X^2+\omega^2M^2+2jRX}$$

$$= \frac{-j\omega MV_1}{2R^2+2jRX} = \frac{-j\omega MV_1}{2R(R+jX)}$$

حيث استخدمنا الشرط المعطى بالمعادلة (11)، ومن ثم:

$$|I_2| = \frac{\omega MV_1}{2R(R^2+X^2)^{1/2}} = \frac{V_1}{2R} \quad (13)$$

تدل هذه النتائج على أنه عندما يكون ترابط الدارتين شديداً over-coupled ($\omega M > R$) يرتفع التيار الثانوي إلى $V_1/2R$ عند النهايتين الجانبيتين اللتين تعطيهما المعادلة (11)، في حين ينخفض إلى ما دون هذه القيمة عند النقطة $X=0$.

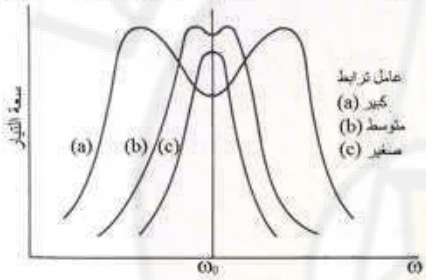
يظهر في الشكل7 السلوك العام للتيار الثانوي، حيث تتحدد درجة الترابط من خلال عامل الترابط الذي يعرّف على النحو:

$$\chi = M/(L_1L_2)^{1/2} = M/L \quad (14)$$

في الحالة التي تكون فيها الدارتان متطابقتين.

يحدث الترابط الحرج الذي يحقق الشرط $\omega_0 M = R$ إذن عندما يأخذ عامل الترابط القيمة:

$$\chi_0 = R/\omega_0 L = 1/Q \quad (15)$$



الشكل7. منحنيات التجاوب لمرشح عصابي مترابط عند درجات مختلفة من الترابط

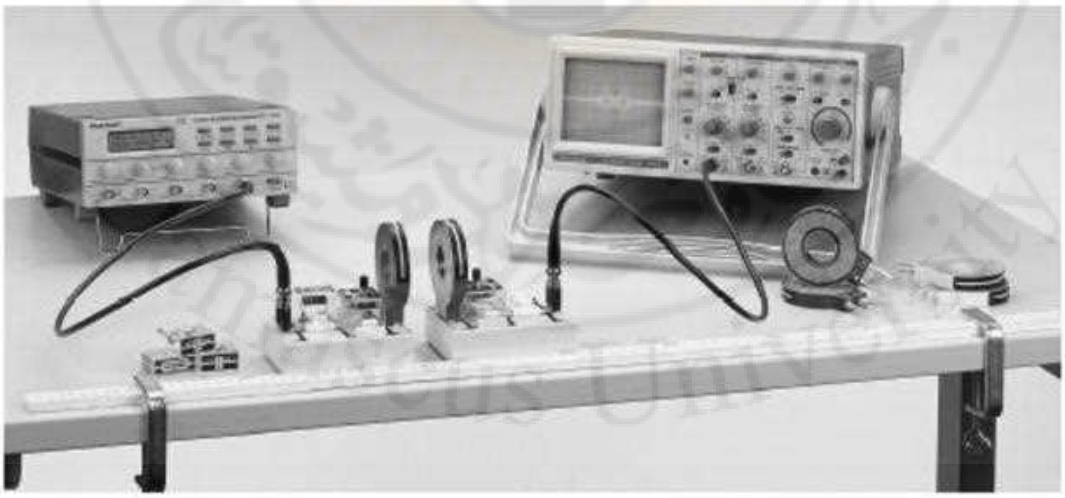
يبين الشكل7 منحنيات التجاوب لمرشح عصابي مترابط في الحالة $Q=100$، وفي درجات مختلفة من الترابط يأخذ فيها عامل الترابط χ كلاً من القيم $(\chi_0/2$ و χ_0 و $2\chi_0)$. إن المنحني الأول يشبه منحني التجاوب العادي ولو أن التيار يكون دائماً أخفض من أعلى تيار ممكن $V_1/2R$. في حين يتضمن المنحني الثاني نهاية عظمى واحدة في مركزه، ولكنها واضحة التفلطح

لانطباق الجذور الثلاثة عليها. ومجرد أن يصبح $\chi > \chi_0$ تتقعر هذه النهاية وتبتعد النقطتان الجانبيتان إحداهما عن الأخرى، ويزداد التقعر عمقاً بقدر ما يكون عامل الترابط أكبر. عندما يكون Q كبيراً والتواتر قريباً من التجاوب يمكن أن نكتب $X = \Delta\omega L$، ويكون عرض عصابة التواتر بين النهايتين الجانبيتين (المعادلة11):

$$\Delta f / f_0 = (\Delta\omega/\omega_0) \approx \left\{\frac{M^2}{L^2} - \frac{R^2}{\omega_0^2 L^2}\right\}^{1/2} \quad (16)$$
$$= (\chi^2 - 1/Q^2)^{1/2} = (\chi^2 - \chi_0^2)^{1/2}$$

3. الأدوات والأجهزة

مولد للاهتزاز (من 2Hz إلى 6MHz)، وراسم اهتزاز، ملف عدد لفّاته 35 لفة وتحريضيته $75\mu H$ (العدد 2)، ملف عدد لفّاته 50 لفة وتحريضيته 150μH (العدد 2)، ملف عدد لفاته 75 لفة وتحريضيته 350μH (العدد 2)، وملف 150 لفة قصير. مكثفة متغيرة 500pF (العدد 2)، مقاومة كربونية $22k\Omega$، مقاومة كربونية $47k\Omega$، مقاومة كربونية $100k\Omega$، ومقاومة كربونية 1MΩ (العدد 2)، ومقاومة كربونية $82k\Omega$، علبة مكثفات $1/470pF$، قابس توصيل أبيض اللون البعد بين سنيه $19mm$ (العدد 7)، علبة توصيل (العدد 2)، خطاف G (العدد 2)، متر قياس، أداة توفيقية مزدوجة مقبس BNC وقابس $4mm$ (العدد 2)، كابل BNC معزول $75cm$ (العدد 2)، وكابل BNC $150cm$ وأخيراً سلك توصيل أصفر (العدد 2) (الشكل8).

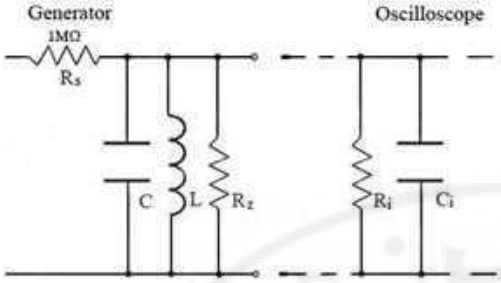


الشكل8. معدات تجربة تعيين عامل الترابط في مرشح عصابي

4. طريقة العمل

1.4. قياس عامل جودة دارة مهتزة وعامل تبديدها بالاعتماد على منحني التجاوب

توصل دارة مهتزة مكونة من ملف ومكثفة على التوازي، براسم اهتزاز وفق الشكل9. تتم تغذية هذه الدارة بتيار ثابت من خلال منبع للاهتزاز عن طريق مقاومة $R_s = 1\text{M}\Omega$ على التسلسل على النحو المبين في الشكل نفسه. حيث يتم اختيار نمط المسح sweep في "subfunctions" على مولد الاهتزاز، ثم يوصل خرج الدارة بالراسم الذي يعمل وفق النمط $x-y$. قم أولاً بإعداد منحني التجاوب باللجوء إلى مسح تواتر المولد ضمن المجال التواتري المناسب. حدّد التواترات f_1 و f_0 و f_2 (الشكل2)، وقم بقياسها مستعيناً بقاعدة الزمن أو بالمؤقت الرقمي (خذ عدة قياسات واحسب المتوسط)، ثم كرر القياسات السابقة على الملفات الأخرى. (في حال عدم توفر منبع تواتر ماسح، تؤخذ قراءات التوتر V وتغيراتها مع تغير التواتر، ويرسم شبيه الشكل2؛ يفضل حساب تواتر التجاوب أولاً نظرياً وتغيير التواتر بجواره).



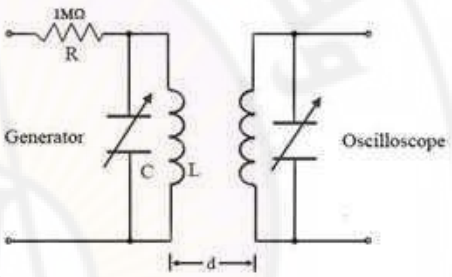
الشكل9. دارة مهتزة على التوازي وعلى التسلسل مع مقاومة $R_s = 1\text{M}\Omega$

2.4. قياس عاملي الجودة والتبديد بالاعتماد على ناقلية التوازي

قم بتخميد الدارة المهتزة بإضافة مقاومات أخرى على التوازي R_z (الناقلية G_z). فإذا رسمنا مقلوب كمون التجاوب بدلالة الناقلية الإضافية G_z نحصل على خط مستقيم. إن نقطة تقاطع هذا الخط مع المحور x تعطي ناقلية التوازي G_p (طريقة باولي). يمكن حساب الممانعة المميزة وعامل التبديد δ_{crit} وعامل الجودة Q من ناقلية التوازي G_p وتواتر التجاوب $\omega_0 = 2\pi f_0$ بحيث أن سعة الدارة المهتزة $C_{tot} = C + C_i$. (تجدر ملاحظة أن عامل الجودة المقيس يأخذ في الحسبان كلاً من مقاومة الدخول للراسم $R_i = 1\text{M}\Omega$ وسعة الدخول $C_i = 30\text{pF}$ والمقاومة التسلسلية $R_s = 1\text{M}\Omega$).

3.4. تعيين عامل الترابط

قم بإعداد الدارتين المهتزتين المتماثلتين على النحو المبين في الشكل8 وما يقابلهما في الشكل10، بحيث توصل إحداهما بمولد الاهتزاز والثانية بالراسم. يجب توليف الدارتين على التواتر نفسه (قاطعة المسح على الوضعية on sweep، on) من خلال المكثفتين المتغيرتين.



الشكل10. دارة مرشح عصابي مترابط

اجعل الملفين في هذه الحالة قريبين أحدهما من الآخر (الترابط بالتحريض) وقم بقياس تواتر التجاوب عند النهاية العظمى f_0 (أو في المركز)، وتواتر كل من النهايتين الجانبيتين f_1 و f_2 بدلالة البعد بين الملفين (الشكل10). وذلك من أجل تسعة أبعاد بدءاً من الترابط الشديد، أي إن الملفين متلاصقان، حتى انعدام الترابط تقريباً.

5. تحليل النتائج والمناقشة

1.5. عامل الجودة وعامل التبديد

في حالة دارة التجاوب المتوازية المكونة من تحريضية تبديدية ومكثفة يمكن التسليم بدارة مكافئة بناقليتين على التوازي G_{pL} و G_{pC}.

احسب كلاً من عامل جودة وعامل تبديد الدارة المهتزة من خلال عرض عصابة التجاوب (الشكل2)، بالاعتماد على العلاقتين:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$ ، و $$\tan\delta_{crit} = \frac{1}{Q}$$

وقارنه بالقيمة المحسوبة من العلاقة (5) مع الانتباه إلى أن سعة المكثفة التي يجب تطبيقها تمثل السعة الكلية التي تأخذ في الحسبان سعة مكثفة الدخول للراسم $C_{tot} = C + C_i$ (حيث $C_i = 30\text{pF}$) ومقاومة الدخول للراسم $R_i = 1\text{M}\Omega$. وازن بين القيم المقيسة والقيم المحسوبة.

2. عامل الترابط

a) احسب عامل الترابط χ وفقاً للعلاقة:

$$\chi = \tan\delta_{\text{crit}}\left[\frac{V_{\max}}{V_{\min}} + \sqrt{\left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}}\right)^2 - 1}\right]$$

حيث δ_{crit} عامل التبديد الحرج (الحالة المثالية) للدارة الواحدة. وبقدر ما يكون الترابط شديداً يكون البعد بين النهايتين العظميين أكبر.

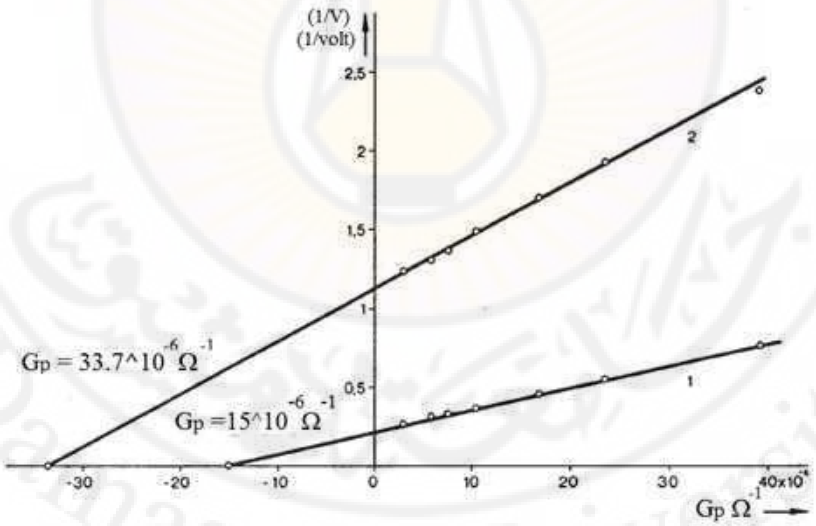
b) ارسم تغيرات كل من عامل الترابط χ وعرض عصابة الترابط Δf بدلالة البعد بين

الملفين على النحو المبين في الشكلين 12 و13 على الترتيب، ثم بين فيما إذا كان المنحني الناتج يتفق كيفياً مع ما تعطيه المعادلة (14) في الأول والمعادلة (16) في الثاني.

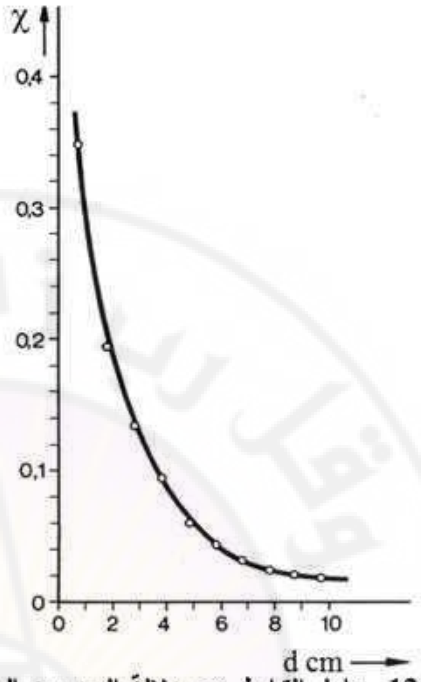
يتعين عرض عصابة المرشح في حالة الترابط الشديد من خلال التواترين اللذين يهبط بدءاً منهما الكمون إلى القيمة $V_{\min}$ الموافقة للتواتر المركزي f_0، ويمكن حسابها بالاعتماد على تواتري النهايتين العظميين f_1 و f_2 وفقاً للعلاقة: $\Delta f = \sqrt{2}(f_2 - f_1)$

ملاحظة. تزودنا النواسات ذات الترابط الرياضي بمماثل ميكانيكي للدارات المهتزة المترابطة (التواتران الطبيعيان للنواسين المترابطين اللذين يولدان الخفقان، يقابلان تواتري النهايتين العظميين).

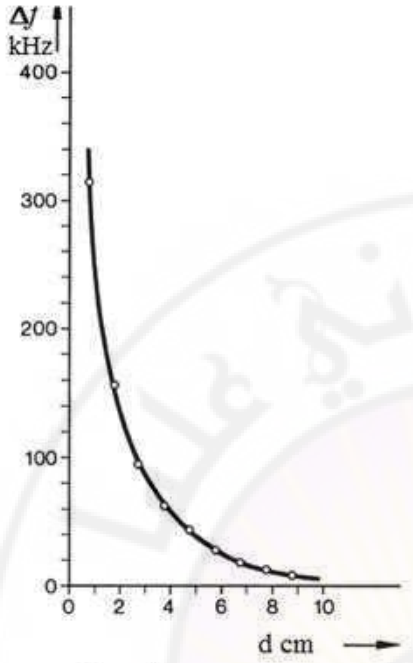
ملحق: تجد في الصفحة التالية كلاً من المنحنيات البيانية لمقلوب كمون التجاوب بدلالة مقاومة التوازي الإضافية، ولتغير عامل الترابط بين ملفين بدلالة البعد بينهما، ولعرض العصابة المارة بدلالة البعد بين الملفين.



الشكل11. مقلوب كمون التجاوب بدلالة الناقلية الإضافية، المستخدمة في تعيين G_p، 1- ملف 75 لفة و2- ملف 150 لفة



الشكل12. عامل الترابط χ بدلالة البعد بين الملفين في حالة الترابط الشديد



الشكل 13. عرض العصابة بدلالة البعد بين الملفين

Damascus University

التجربة (13) (للإراءة)

منحنيات ليساجو

انضمام حركتين جيبيتين متعامدتين في المنحى

1. هدف التجربة

دراسة الخصائص العامة لانضمام موجتين متعامدتين في المنحى.

2. المبدأ النظري

لننظر في حالة جسيم يتحرك في مستو بحيث يخضع لقوتين متعامدتين تمثل إحداهما بحركة جيبية وفق المحور x والأخرى بحركة جيبية وفق المحور y. نعالج في بادئ الأمر الحالة التي يكون فيها للحركتين التواتر نفسه باختيار مبدأ الزمن بحيث يكون الطور الابتدائي للحركة وفق المحور X صفراً، يكون لدينا في حالة الإحداثي x:

$$x = A\sin\omega t \qquad (1)$$

أما الحركة وفق المحور Y فتصفها المعادلة:

$$y = B\sin(\omega t + \delta) \qquad (2)$$

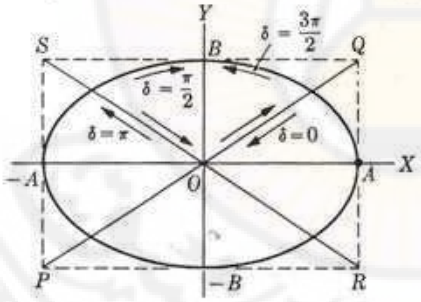
حيث δ يمثل في هذه الحالة فرق الطور بين اهتزازتي x و y. لقد افترضنا أيضاً أن السعتين A و B مختلفتان. إن مسار الجسيم هو بالطبع محدود بالمستقيمات الأربعة $x = \pm A$ و $y = \pm B$ (انظر الشكل 1).

ندرس فيما يلي بعض الحالات الخاصة.

a) عندما تكون الحركتان متفقتين في الطور، يكون $y = B\sin\omega t$ و $\delta = 0$، وهذا يعطي، بضمه إلى المعادلة (1): $Y = (B/A)x$

وهي معادلة المستقيم PQ في الشكل 1، والحركة الناتجة جيبية سعتها $\sqrt{A^2 + B^2}$ على هذا المستقيم؛ لأن بعد الجسم r على طول المستقيم PQ هو:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{A^2 + B^2}\sin\omega t \qquad (3)$$



الشكل 1. انضمام حركتين جيبيتين لهما التواتر نفسه متعامدتين في المنحى. تعلق المسار المسلوك بفرق الطور.

b) إذا كانت الحركتان متعاكستين في الطور، كان $\delta = \pi$ و $y = -B\sin\omega t$ وهذه تعطي بضمها إلى المعادلة (1)

$$y = -\frac{B}{A}x$$

وهي معادلة المستقيم RS. والحركة هنا أيضاً جيبية سعتها $\sqrt{A^2+B^2}$ وعليه نقول: حين يكون $\delta = 0$ أو يساوي π فإن تداخل الحركتين الجيبيتين المتعامدتين اللتين لهما التواتر نفسه يولد استقطاباً مستقيماً *Rectilinear polarization* .

c) حين يكون فرق الطور $\delta = \pi/2$، يقال إن الحركتين على تربيع وفق المحورين X و Y وإن:

$$y = B\sin(\omega t + \pi/2) = B\cos\omega t$$

وبضم ذلك إلى المعادلة (1) نجد:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1$$

وهي معادلة قطع ناقص (الشكل1)، تتم الحركة عليه في اتجاه عقارب الساعة. يمكن التحقق من ذلك بالبحث عن سرعة الجسيم عند النقطة $x = +A$، التي توازي المحور Y. إن مركبة السرعة وفق المحور Y هي

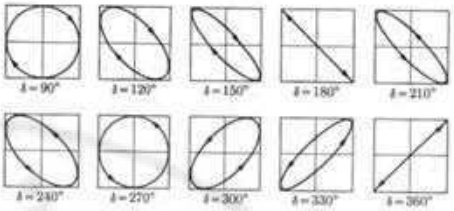
$$v_y = dy/dt = -\omega B\sin\omega t = -\omega B$$

ولكونها سالبة يمر الجسيم من A متجهاً نحو الأسفل، وهذا يقابل اتجاه دوران عقارب الساعة. نحصل على القطع الناقص نفسه في الحالة $\delta = 3\pi/2$ أو $\delta = -\pi/2$، ولكن الحركة تكون عندئذ في اتجاه معاكس لعقارب الساعة. هل يمكنك أن تتحقق من هذا الأمر؟ يمكن القول إن تداخل حركتين جيبيتين لهما التواتر نفسه يؤدي، حين يكون فرق الطور بينهما $\pm\pi/2$، إلى توليد استقطاب إهليلجي Elliptical polarization، يكون محورا القطع الناقص الموافق موازيين لمنحيي الحركتين. وحين يكون $A = B$، يتحول القطع الناقص إلى دائرة ولدينا عندئذ استقطاب دائري *Circular p*. أما في حالة قيمة اختيارية لفرق الطور δ فيكون المسار أيضاً قطعاً ناقصاً ولو كان محوراه مائلين بالنسبة إلى محور الإحداثيات. يبين الشكل2 المسارات المقابلة لفروق طور معينة.

يمكن أن تكون الحركتان الموصوفتان بالمعادلتين (1) و(2)، قوتين متجهتين وفق المحورين x و y تساويان: $F_x = -kx$ و $F_y = -ky$ على الترتيب. فالقوة المحصلة المؤثرة على الجسيم هي إذن:

$$\begin{aligned} F &= u_x F_x + u_y F_y \\ &= -k(u_x x + u_y y) = -kr \end{aligned} \qquad (4)$$

تولد القوة الممثلة بالمعادلة (4) دائماً حركة مستوية، حتى ولو كان الجسيم يستطيع التحرك في الفراغ؛ لأن القوة مركزية، ومِنْ ثَمَّ فإن أعم مسار تحت تأثير مثل هذه القوة هو القطع الناقص.



الشكل2. المسارات المقابلة لفروق طور خاصة

ويعبر عن الطاقة الكامنة المقابلة للقوة الممثلة بالمعادلة (4) بالعلاقة:

$$E_p = \tfrac{1}{2}k(x^2 + y^2) = \tfrac{1}{2}kr^2 \qquad (5)$$

يشكل تداخل حركتين اهتزازيتين متعامدتين مختلفتين بالتواتر حالة أخرى مهمة. لدينا:

$$x = A_1 \sin \omega_1 t \qquad (6a)$$

$$y = A_2 \sin(\omega_2 t + \delta) \quad \text{و} \qquad (6b)$$

يمثل الشكل3 مسارات أشكال ليساجو *Lissajous figures*، في حالة قيم عديدة للنسبة ω_2 / ω_1 ولفرق الطور في كل حالة.

3. الأدوات والأجهزة

مولدان للاهتزاز، راسم اهتزاز، أسلاك توصيل، مقاومات مختلفة، مكثفات سعاتها مختلفة، لوحة لتثبيت المقاومات والمكثفات.

4. طريقة العمل

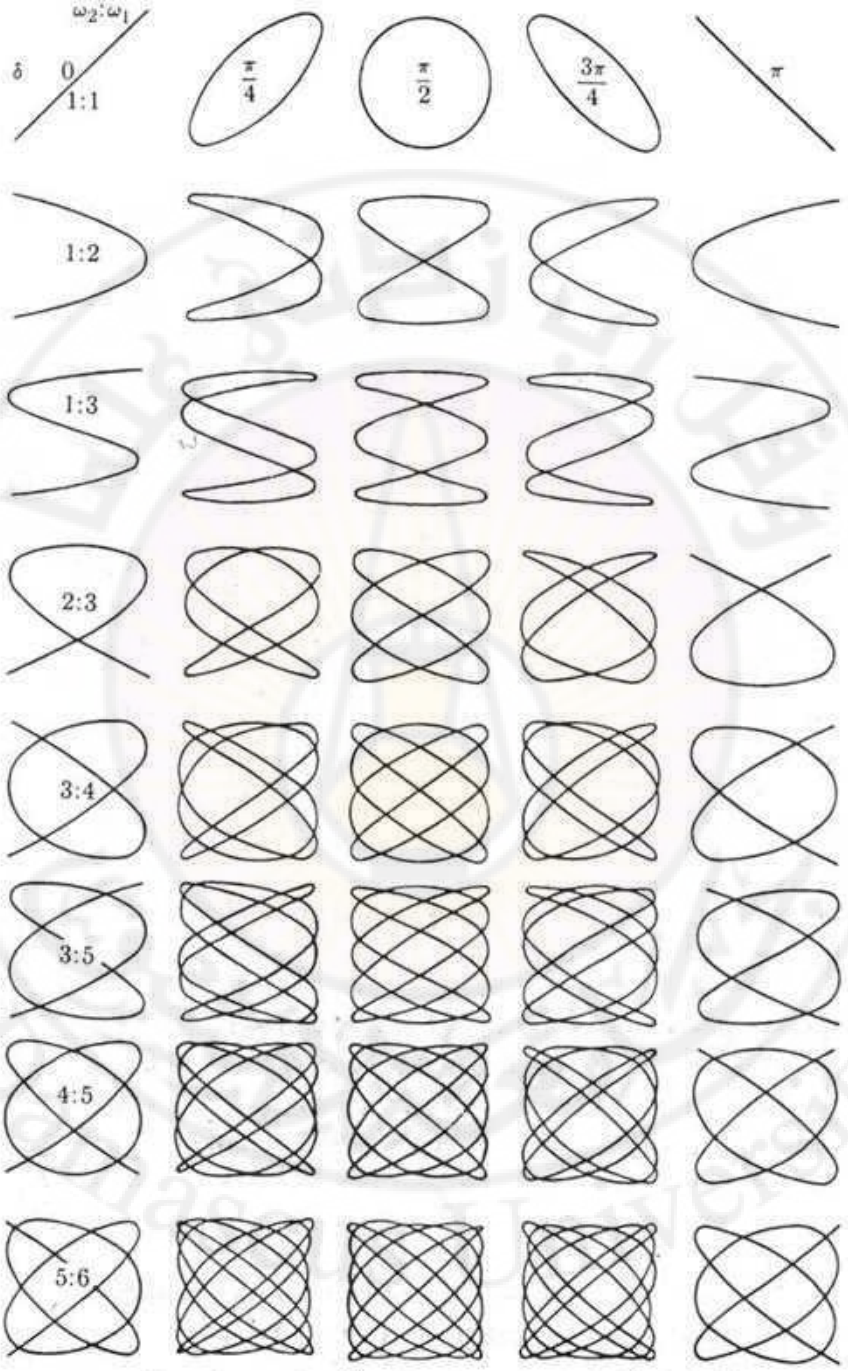
1. ركب دارة مكونة من مولد للاهتزاز وعدة مقاومات على التسلسل مع مكثفة. طبق على الدارة إشارة صغيرة من مولد الاهتزاز تواترها 50 هرتز.

2. اجعل راسم الاهتزاز في الوضعية Y-X. صل بين طرفي إحدى المقاومات بالمدخل الأفقي لراسم الاهتزاز وصل بين طرفي مقاومة أخرى بالمدخل الشاقولي للراسم، ماذا تلْحَظُ على شاشة الراسم؟ حاول تغيير قيمة كل من المقاومتين، ما الذي يطرأ على الشكل؟ صل بين طرفي المكثفة (عوضاً عن المقاومة الثانية) بالمدخل الشاقولي لراسم الاهتزاز، علل ما تشاهده.

3. من مولدي الاهتزاز طبق على راسم الاهتزاز إشارتين لهما التواتر نفسه، إحداهما على المدخل الأفقي والأخرى على المدخل الشاقولي، وحاول من خلال الضبط الدقيق للتواتر أن تحصل على شكل مستقر على الشاشة. اترك تواتر إحدى الإشارتين ثابتاً وضاعف تواتر الإشارة الأخرى ثم اجعله ثلاثة أضعاف. ماذا تلاحظ؟

4. كرر التجربة السابقة ولكن بجعل تواتر الإشارة الذي كنت تغيره ثابتاً وقم بمضاعفة تواتر الإشارة الذي كان ثابتاً ثم اجعله ثلاثة أضعاف، ماذا تلاحظ؟

5. كرر ما سبق، ولكن بجعل النسبة بين تواتري الإشارتين تساوي كسراً بسيطاً، ماذا تشاهد؟



الشكل3. أشكال ليساجو تتعلق بالنسبة ω_2 / ω_1 وبفرق الطور

التجربة (14)

دراسة مفعول دوبلر بالأمواج فوق الصوتية

1. هدف التجربة

1. قياس التغيير الذي يدركه مراقب ساكن في تواتر منبع متحرك للأمواج الصوتية أو مراقب متحرك ومنبع ساكن، وذلك بدلالة سرعة المنبع أو المراقب.

2. التحقق من قانون التناسب الطردي بين تغير التواتر Δf وسرعة منبع الأمواج فوق الصوتية. وتعيين سرعة الصوت في الهواء.

2. المبدأ النظري

إن لمفعول دوبلر Doppler effect الذي يتمثل بالتغير الظاهري لتواتر منبع (للأمواج الصوتية أو الكهرطيسية على حد سواء) في حالة حركة بالنسبة إلى راصد، أهمية كبيرة في الحياة العملية وفي الطب على حد سواء. حيث يمكن بالاعتماد على هذا المفعول قياس سرعة الدم مثلاً لدى الفرد ومِنْ ثَمَّ التعرف على حالته الصحية.

إذا كانت سيارة شرطة تقف على ناصية الطريق وهي تطلق صافرة الإنذار ذات التواتر $1000\,Hz$، وكنت أنت تقف على الناصية فإنك تسمع التواتر نفسه. فإذا كان ثمة حركة نسبية بينك وبين سيارة الشرطة اقتراباً أو ابتعاداً فإنك تسمع تواتراً مختلفاً. إذا كنت تقود سيارتك نحو سيارة الشرطة بسرعة $120\,km/h$ مثلاً فإنك ستسمع تواتراً أعلى (التواتر $1096\,Hz$ أي ارتفاعاً قدره $96Hz$). أما إذا كنت تقود سيارتك مبتعداً عن سيارة الشرطة بالسرعة نفسها، فإنك ستدرك تواتراً أخفض ($904Hz$ أي أخفض بمقدار $96Hz$).

إن هذين التغيرين في التواتر والمرتبطين بالحركة هما مثالان عن مفعول دوبلر.

إن مفعول دوبلر لا يطبق على الأمواج الصوتية فحسب، بل على الأمواج الكهرطيسية أيضاً بما فيها الأمواج المكروية والأمواج الراديوية والضوء المرئي. غير أننا لن ندرس هنا إلّا الأمواج الصوتية والهواء هو الوسط الذي تنتقل فيه هذه الأمواج كجملة مرجعية. هذا يعني أننا سنقيس سرعتي كل من المنبع والكاشف بالنسبة إلى الهواء. (ولسكون جسم الهواء بالنسبة إلى الأرض فإن السرعات تقاس بالنسبة إلى الأرض، ما لم يذكر غير ذلك). سنفترض بأن المنبع والكاشف إما يقترب

أحدهما من الآخر وإمّا يبتعد عنه بسرعة أخفض من سرعة الصوت. فإذا كان الكاشف أو المنبع أو كلاهما متحركاً يرتبط التواتر الذي يدركه الكاشف f' بالتواتر f الذي يصدره المنبع بالعلاقة التالية التي تدل على مفعول دوبلر العام:

$$f' = f\frac{v \pm v_D}{v \pm v_S} \qquad (1)$$

حيث v سرعة الصوت في الهواء، v_D سرعة الكاشف بالنسبة للهواء، و v_S سرعة المنبع بالنسبة للهواء. تحدد القاعدة التالية اختيار الإشارة الموجبة أو السالبة:

عندما يتحرك كل من المنبع أو الكاشف نحو الآخر تكون إشارة سرعته بحيث تحدث انزياحاً للتواتر نحو الأعلى. وبالعكس تكون إشارة سرعة كل منهما عندما يبتعد أحدهما عن الآخر بحيث تحدث انزياحاً في التواتر نحو القيمة الأخفض. باختصار: الاقتراب يعني ارتفاع التواتر والابتعاد يعني انخفاض التواتر. إليك بعض الأمثلة عن هذه القاعدة. إذا كان الكاشف يتحرك نحو المنبع، استخدم إشارة الجمع في بسط المعادلة (1) لتحصل على ارتفاع التواتر. وإذا كان يبتعد عنه استخدم إشارة السالب في البسط لتحصل على انخفاض في التواتر. وإذا كان ساكناً ضع $v_D = 0$. إذا كان المنبع يتحرك نحو الكاشف، استخدم إشارة السالب في مقام المعادلة (1) لتحصل على ارتفاع في التواتر. وإذا كان يبتعد عنه فضع إشارة موجب في المقام لتحصل على انخفاض في التواتر. وإذا كان المنبع ساكناً ضع $v_S = 0$ في المقام.

نقوم الآن باشتقاق معادلتي مفعول دوبلر في الحالتين الخاصتين التي يكون فيهما أحدهما ساكناً والآخر متحركاً ثم نشتق المعادلة العامة لمفعول دوبلر.

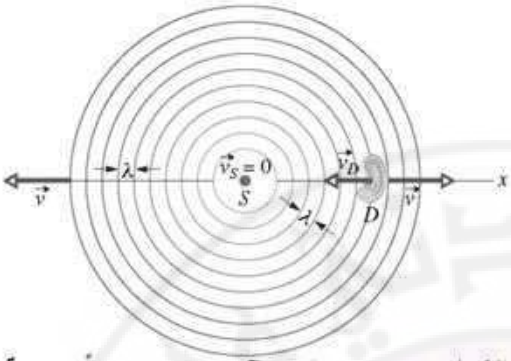
1. عندما يتحرك الكاشف بالنسبة للهواء والمنبع ساكن بالنسبة للهواء، فإن الحركة تغير التواتر الذي يستقبل به الكاشف صدور الموجة، ومِنْ ثَمَّ تواتر الموجة الصوتية الذي يدركه.

2. عندما يتحرك المنبع بالنسبة للهواء والكاشف ساكن بالنسبة للهواء، تغير الحركة الطول الموجي للموجة الصوتية، ومِنْ ثَمَّ التواتر الذي يستقبله الكاشف (تذكر أن التواتر يرتبط بالطول الموجي).

a) الكاشف يتحرك والمنبع ساكن

يتحرك الكاشف (ممثلاً بالأذن) في الشكل1 بسرعة v_D نحو منبع ساكن يصدر صدوراً موجية كروية الشكل طولها الموجي λ وتواترها f، تنتقل بسرعة الصوت v في

الهواء. ترسم صدور الموجة بحيث يبعد أحدها عن الآخر بمقدار الطول الموجي. إن التردد الذي يدركه الكاشف يتمثل في معدل استقباله لصدور الموجة (أو الأطوال الموجية الفردية). فإذا كان الكاشف ساكناً، فإن ذلك المعدل هو نفسه f، ولكن نظراً لأن الكاشف ينتقل ضمن صدور الموجة، سيكون معدل استقباله لها أعلى ومِنْ ثَمَّ يكون التردد الذي يدركه f' أعلى من f.



الشكل 1. منبع ساكن S يصدر صدوراً موجية كروية، يبعد كل منها عن الآخر بمقدار الطول الموجي تنتشر بعيداً عنه بسرعة الصوت v. يتحرك كاشف للصوت D ممثلاً بالأذن بالسرعة v_D نحو المنبع. يدرك الكاشف تواتراً أعلى بسبب حركته

لنـــدرس الآن حالـــة الكاشـــف الســـاكن (الشكل 2). تتحرك صدور الموجة المسافة vt نحـو اليمـين خـلال الـزمن t. إن عـدد الأطوال الموجية في تلك المسافة vt يمثل عدد الأطوال الموجية التي يستقبلها الكاشف خـلال الـزمن t ويسـاوي هـذا العـدد vt/λ. ويكـون معـدل اسـتقبال الكاشـف للأطـوال الموجيـة، والـذي يمثـل التـواتر الـذي يدركـه الكاشف:

$$f = \frac{vt/\lambda}{t} = \frac{v}{\lambda} \qquad (2)$$

في هذه الحالة التي يكون فيها الكاشف ساكناً لا يظهر مفعول دوبلر، أي إن التواتر الذي يدركه الكاشف هو التواتر نفسه الذي يصدره المنبع.

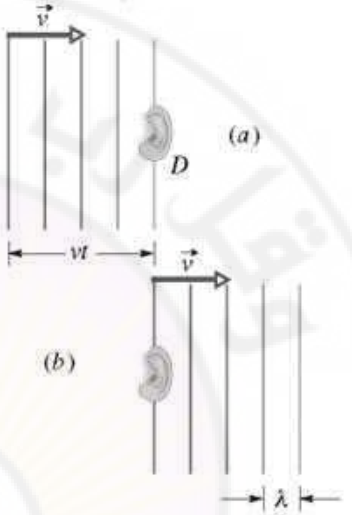
لندرس الحالة التي يتحرك فيها الكاشف

فـــي الاتجـــاه المعـــاكس لصـــدور الموجـــة (الشكل 3). تنتقل صدور الموجة خلال الزمن t المسافة vt نحو اليمين كالسابق، ولكن الكاشف D ينتقـل المسـافة v_Dt إلـى اليسـار. وبـذلك تكـون المسـافة التـي تنتقلهـا صـدور الموجـة بالنسـبة إلـى الكاشـف $vt+v_Dt$. إن عـدد الأطوال الموجية في هذه المسافة النسبية ليس إلاّ عدد الأطوال الموجية التي يدركها الكاشف خـلال الـزمن t، ويسـاوي $(vt+v_Dt)/\lambda$. إن معدل استقبال الكاشف للأطوال الموجية في هـذه الحالـة هـو التـواتر f' الـذي يعطـى بالعلاقة:

$$f' = \frac{(vt+v_Dt)/\lambda}{t} = \frac{v+v_D}{\lambda} \qquad (3)$$

لدينا من المعادلة (2) $\lambda = v/f$ ومن ثم تصبح المعادلة (3):

$$f' = \frac{v + v_D}{v/f} = f\frac{v + v_D}{v} \qquad (4)$$



الشكل2. صدور موجة الشكل1 التي يفترض بأنها مستوية (a) تبلغ كاشفاً ساكناً D و (b) تتجاوزه. وهي تنتقل المسافة vt إلى اليمين خلال الفترة الزمنية t.

لاحظ أن f' في المعادلة (4) يجب أن يكون أعلى من f ما لم يكن $v_D = 0$ (الكاشف ساكن)

وبالتشابه يمكننا إيجاد التواتر الذي يدركه الكاشف إذا كان هذا الأخير يتحرك مبتعداً عن المنبع. في هذه الحالة تنتقل صدور الموجة المسافة $vt - v_D t$ بالنسبة إلى الكاشف خلال المدة الزمنية t، ويعطى التواتر f' بالعلاقة:

$$f' = f\frac{v - v_D}{v} \qquad (5)$$

يجب أن يكون f' في العلاقة (5) أصغر من f ما لم يكن $v_D = 0$.

يمكننا إيجاز المعادلتين (4) و(5) بالعلاقة (الكاشف متحرك والمنبع ساكن):

$$f' = f\frac{v \pm v_D}{v} \qquad (6a)$$

$$f' - f = \Delta f = f\frac{\pm v_D}{v} \quad \text{أو} \qquad (6b)$$

ومِنْ ثَمَّ عندما يرسم الخط البياني لتغير Δf بدلالة v_D فإن ميله يساوي f/v

b) المنبع متحرك والكاشف ساكن

لنفترض بأن الكاشف D ساكن بالنسبة إلى الهواء، وأن المنبع S متحرك نحو الكاشف بالسرعة v_S. إن حركة المنبع تغير طول الموجة الصوتية التي تصدرها، ويلتقط الكاشف التردد الموافق (الشكل4).

ولمعرفة هذا التغير ننطلق من أن الدور $T = 1/f$ هو الفاصل الزمني بين صدري موجة متعاقبين W_1 و W_2. ينتقل صدر الموجة الأول، خلال هذا الزمن، المسافة vT وينتقل المنبع المسافة $v_S T$. في نهاية الفاصل الزمني المذكور يصدر صدر الموجة التالي W_2. تكون المسافة بين W_1 و W_2 في اتجاه حركة المنبع والتي تمثل الطول الموجي λ' للأمواج المتحركة في ذلك الاتجاه

$vT - v_S T$ ؛ فإذا كشف D تلك الأمواج فإنه يكشف التواتر f' الذي يعطى بالعلاقة:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{vT - v_S T} = \frac{v}{v/f - v_S/f}$$

$$f' = f\frac{v}{v - v_S} \qquad (7)$$

لاحظ أن f' يجب أن يكون أعلى من f مالم تكن $v_S = 0$.

عندما يتخذ المنبع الاتجاه المعاكس يصبح الطول الموجي للأمواج الصادرة λ' $vT + v_S T$. وعندما يكشف D هذه الأمواج فهو يكشف التواتر f' الذي يعطى بالعلاقة:

$$f' = f\frac{v}{v + v_S} \qquad (8)$$

يجب أن يكون f' في هذه الحالة أخفض من f ما لم تكن $v_S = 0$. يمكن إيجاز المعادلتين السابقتين على النحو:

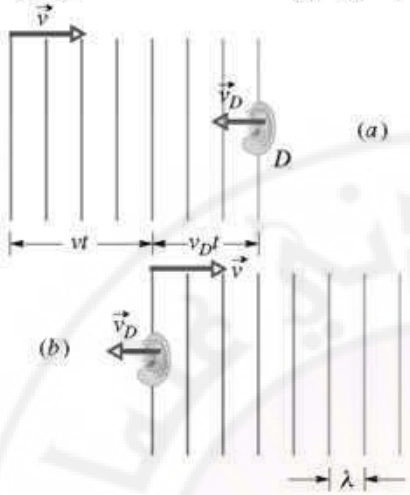
$$f' = f\frac{v}{v \pm v_S} \qquad (9a)$$

$$= f\left(\frac{v \pm v_S}{v}\right)^{-1} \approx f\left(1 \mp \frac{v_S}{v}\right)$$

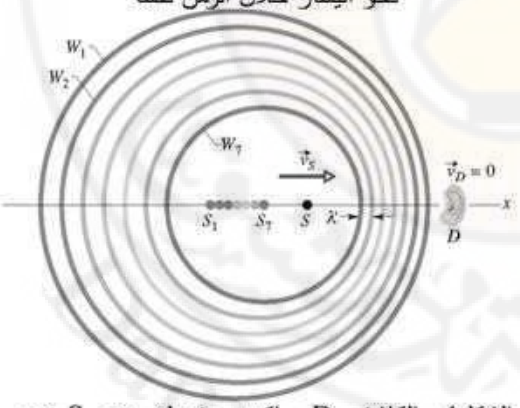
$$f' - f = \Delta f = f\left(\mp \frac{v_S}{v}\right) \qquad (9b)$$

ومِنْ ثَمَّ عندما يرسم الخط البياني لتغير Δf بدلالة v_S فإن ميله يساوي f/v.

إن المعادلة العامة ليست صالحة في الحالة التي يتحرك فيها الكاشف والمنبع معاً فحسب؛ بل في الحالات الخاصة التي درسناها



الشكل3. صدور الموجة **(a)** تبلغ الكاشف الذي يتحرك في الاتجاه المعاكس لانتقالها و **(b)** تتجاوزه. تنتقل صدور الموجة المسافة vt نحو اليمين خلال الفترة الزمنية t ، في حين ينتقل الكاشف المسافة $v_D t$ نحو اليسار خلال الزمن نفسه



الشكل4. الكاشف D ساكن، ويتحرك منبع S نحوه بالسرعة v_s. تم إصدار صدر الموجة W_1 لحظة كون المنبع في النقطة S_1، وصدر الموجة W_7 لحظة كونه في النقطة S_7. في اللحظة الموصوفة يكون المنبع في S . يدرك الكاشف تواتراً أعلى لأن المنبع المتحرك يتعقب صدور أمواجه، فيصدر أطوالاً موجية أقصر في اتجاه الحركة

أيضاً. ففي الحالة التي يكون فيها الكاشف متحركاً والمنبع ساكناً ما علينا إلاّ أن نعوض $v_S = 0$ في المعادلة (1) لنحصل على المعادلة (6b) التي سبق اشتقاقها. في الحالة التي يكون فيها المنبع متحركاً والكاشف ساكناً نعوض $v_D = 0$ في العلاقة (1) فنحصل على العلاقة 9b التي سبق إيجادها. إذن يجب تذكر المعادلة (1).

من عجائب الخلق أن الخفافيش والفراش تطبق مفعول دوبلر في عوالمها من دون أي دراسة في الفيزياء. حيث تطير الخفافيش لتبحث عن فرائسها بإصدار أمواج فوق صوتية من منخريها، ومن ثم استقبال أصدائها بأذنيها. تتميز هذه الأمواج بارتفاع تواتراتها (بالنسبة للأمواج المسموعة) التي تقدَّر بنحو $83\,kHz$ وهي أعلى بكثير من عتبة السمع لدى الإنسان التي تبلغ $20\,kHz$.

إذا كانت الفراشة هي الفريسة مثلاً، تؤدي الحركتان النسبيتان لكل من الخفاش والفراشة بالنسبة إلى الهواء إلى اختلاف التواتر الذي يسمعه الخفاش ببضعة كيلو هرتز عن التواتر الذي أصدره. يقوم الخفاش آلياً بترجمة هذا الفارق إلى سرعة نسبية بينه وبين الفراشة ومِنْ ثَمَّ يستطيع أن ينقضَّ عليها. يتجنب بعض الفراش الوقوع في الأسر بالابتعاد عن اتجاه الصوت الذي يسمعه. حيث يؤدي هذا الاختيار لمسار الطيران إلى تخفيض فارق التواتر بين الصوت الذي يصدره الخفاش والصوت الذي يسمعه ومِنْ ثَمَّ لا يحس الخفاش بالصدى. كما يتجنب بعض الفراش الوقوع في الأسر من خلال إحداث قرقعة بهدف توليد أمواج فوق صوتية خاصة به، ومِنْ ثَمَّ يشوش نظام الكشف لدى الخفاش ويضلّله.

يستخدم في هذه التجربة ترجامان transducers (ستجد تعريف الترجام لاحقاً) متماثلان أحدهما يقوم بدور المرسل (منبع الصوت)، والآخر يؤدي دور المستقبل وذلك بحسب طريقة وصل كل منهما. يوصل أحد الترجامين بعربة تتضمن سواقة كهربائية والآخر يثبت على حامل. يقاس تواتر الإشارة بعدّاد مقدرته الفاصلة مرتفعة، ويتم تعيين سرعة الترجام من العلاقة:

$$v = \Delta S / \Delta t \qquad (10)$$

يجري قياس كل من Δt (الزمن الذي تستغرقه العربة في قطع مسافة معينة ΔS) باستخدام ساعة إيقاف أو حاجزين ضوئيين ووحدة Cobra وحاسب وهو الخيار الأفضل. لماذا؟.

الترجام transducer

الترجام بلورة كهرضغطية من مادة سيراميكية كالكوارتز مثلاً. يمكن لهذه البلورة أن تولّد موجة ضغطية (صوتية) لدى تطبيق إشارة كهربائية عليها، وأن تولّد إشارة كهربائية لدى استقبالها موجة ضغطية (صوتية).

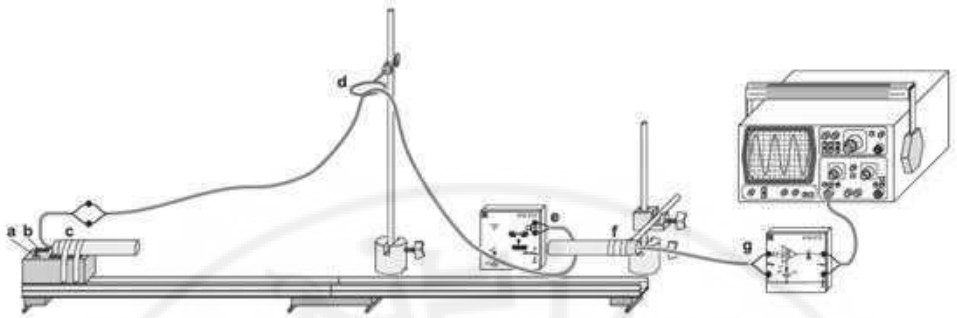
3. الأدوات والأجهزة

1. ترجامان للأمواج فوق الصوتية بتواتر 40kHz(راجع الملحق1 في نهاية التجربة)، 2. مولد للاهتزاز 40kHz (راجع الملحق2)، 3. مضخم للاهتزاز AC (راجع الملحق3)، 4. عربة بمحرك كهربائي (راجع الملحق4)، 5. بطاريتان 9V، 6. سكّتان معدنيّتان دقيقتان (2)، 7. وصلة بالسكة، 8. مجموعة أزواج قدمية، 9. عداد رقمي (راجع الملحق5)، 10. راسم اهتزاز بقناتين، 11. ساعة إيقاف أو حاجزان ضوئيان ووحدة Cobra وحاسب، 12. قاعدتان سرجيّتان، 13. قضيب حامل بطول 25cm، 14. قضيب حامل بطول 47cm، 15. ماسك متعدد، 16. ماسك بحلقة، 17. سلك توصيل معدني8m، 18. مجموعة موائم (أدابتر) ثنائي أسود، 19. كابل قياس BNC/4mm لمراقبة إشارة خرج مضخم الاهتزاز على الراسم أو العداد الرقمي.

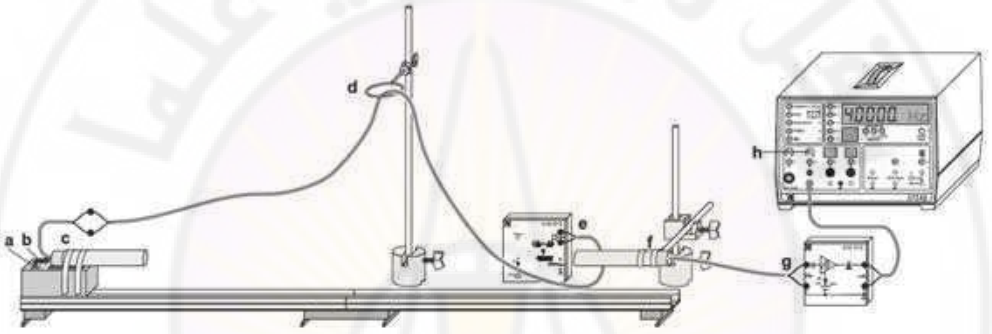
4. طريقة العمل

يجري إعداد التجربة وفق الشكلين 5 و 6

- توصل السكّتان المعدنيتان الدقيقتان بواصل السكة، ويركّب طرفاهما على القدم.
- يثبّت ترجام الأمواج فوق الصوتية (c) الذي يقوم بدور منبع الأمواج فوق الصوتية (بعد مراجعة الملحق1 في هذه التجربة) بشريط لاصق إلى العربة ذات المحرّك (بعد مراجعة الملحق4) وفق الاتجاه الطولاني لكل من الترجام والعربة، ثم تركّب العربة على السكّتين.
- يثبت الماسك ذي الحلقة (d) على القضيب الحامل (47cm).
- يوصل سلك التوصيل المعزول بالأدابتر (adapter) إلى الكابل المزدوج للترجام، ويمرّر من خلال الحلقة (d) وتوصل نهايته الحرة إلى خرج المولد 40 kHz (e) (بعد مراجعة الملحق2).
- يثبت ترجام الأمواج فوق الصوتية الذي يقوم بدور مستقبل الأمواج فوق الصوتية بالقضيب الحامل (25cm) باستخدام الماسك المتعدد، ثم يوصل بدخل المضخم AC (g) (بعد مراجعة الملحق3)، ثم يسدَّد الترجام المستقبل بحيث يقابل الترجام المصدر عند الارتفاع نفسه.



الشكل5. إعداد التجربة بحيث يكون المنبع في حالة حركة (أي إن v_S متغيرة)



الشكل6. إعداد الشكل السابق نفسه، ماعدا أن مضخم إشارة الكاشف يوصل بالعداد عوضاً عن راسم الاهتزاز

- يلف الترجامان بورقة مضادة للانعكاس لتجنب التشويش الناجم عن انعكاس الأمواج فوق الصوتية عند السكة المعدنية.
- يهيأ الترجامان 40kHz للعمل المستمر والمضخم AC على الوضعية " ~ "
- يشغَّل الترجامان لمدة 15 دقيقة حتى يصبح عملهما مستقراً.
- تلقَّم إشارة خرج المضخم إلى راسم الاهتزاز، عن طريق كابل القياس BNC/4mm (انظر الشكل5).
- تراقب إشارة الخرج على راسم الاهتزاز ويحسَّن تسديد الترجامين فوق الصوتيين.
- يُضبط تواتر مولد الاهتزاز بحيث تكون سعة إشارة الخرج عظمى (تواتر التجاوب).
- تجعل سعة إشارة خرج المضخم 0.7V عند أبعد مسافة للعربة عن الترجام المستقبل، وذلك بالتحكم بتضخيم المضخم -AC، وذلك من خلال مجزئ الكمون الدوّار على المضخم.

قياس تواتر ترجام الأمواج فوق الصوتية

- يشغَّل العداد الرقمي (بعد مراجعة الملحق5)، ويلقَّم، عند B، بإشارة خرج المضخم -AC، وذلك عن طريق كابل القياس BNC/4mm (انظر الشكل6) ثم يتم الضغط على الزر B.
- قم بالضغط على زر التواتر، واختر الواحدة Hz.
- تجعل عتبة الدخول 0.7V عند المدخل B، وذلك بالاستعانة بمجزئ الكمون الدوّار (h) على العداد.

قياس تغير التواتر في حالة حركة منبع الأمواج الصوتية:

- تتم تهيئة سرعة العربة v من خلال مجزئ الكمون الدوّار (a) على العربة نفسها (راجع الملحق4).
- يشغَّل محرّك العربة باستخدام القاطعة الثلاثية (b) على العربة.
- لقياس سرعة العربة، يقاس الزمن Δt الذي تستغرقه في قطع مسافة معينة ΔS ولتكن متراً واحداً مثلاً ويسجَّل هذا الزمن.
- يوقف محرك العربة بالقاطعة الثلاثية، ويشرع بقياس التواتر f، بالضغط على زر التشغيل-الإيقاف على العدّاد الرقمي، ويتم إيقاف التشغيل بالضغط على الزر مرة أخرى.
- تضغط القاطعة الثلاثية، ويقاس التواتر المستقبل f' على العداد الرقمي، بالاستعانة بذاكرته، في حالة حركة العربة نحو اليمين بسرعة معينة ويسجَّل التواتر.
- يتم إيقاف محرك العربة بالقاطعة الثلاثية، ويحدَّد التواتر f مرة أخرى.
- تضغط القاطعة الثلاثية، ويقاس التواتر f' في حالة حركة العربة بالسرعة نفسها نحو اليسار ويسجل.
- تكرَّر قياسات التواتر والعربة تتحرك تارة إلى اليمين وتارة إلى اليسار.
- تكرّر القياسات في حالة قيمتين أخريين للسرعة.

مثال لنتيجة القياس:

المسافة المقيسة $\Delta S = 1m$

يضم الجدول1 القيم المقيسة لكل من تواتر منبع الإصدار f والتواتر المستقبل f' في الحالة التي يكون فيها المستقبل (الكاشف) في حالة الحركة.

5. تقييم القياسات والنتائج

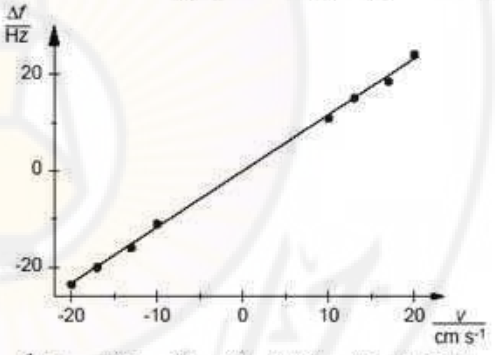
● تعيين التغير في التواتر

يضم الجدول1 زوجين من القيم المقيسة لكل من f' و f اللذين يوافقان قيمة واحدة للسرعة v أو للزمن الموافق الذي تستغرقه العربة (تؤخذ إشارة السرعة في الحسبان). وبعد

حساب الفروق $\Delta f = f' - f$ ، تحسب قيمتها الوسطية. تلخص نتائج الحساب على النحو المبين في الجدول2. حيث تترافق السرعات المحسوبة v_D (من المسافة المقيسة ΔS والزمن المستغرق Δt) مع تغيرات التواتر الموافقة.

- **التحقق من التناسب الطردي بين تغير التواتر وسرعة العربة**

يضم الشكل7 رسماً بيانياً للجدول2. تقع هذه القيم على خط مستقيم يمر بنقطة الأصل، وذلك ضمن حدود دقة القياس.



الشكل7. تغير التواتر $\Delta f = f' - f$ بدلالة سرعة العربة

- **تعيين سرعة الصوت في الهواء:**

ولاتصال الكاشف بالعربة المتحركة فإن ميل الخط المستقيم الذي نحصل عليه لدى رسم تغير Δf بدلالة v_D ويمر بنقطة الأصل في الشكل7 يساوي وفقاً للعلاقة (6b) f / v

ومِنْ ثَمَّ:

الجدول 1

Δt (s)	direction	f_0(Hz)	f(Hz)
5.0	right	40144	40168
	left	40143	40121
	right	40142	40166
	left	40142	40117
6.0	right	40188	40207
	left	40186	40165
	right	40186	40204
	left	40185	40166
7.7	right	40193	40207
	left	40187	40171
	right	40185	40201
	left	40183	40167
10.0	right	40147	40157
	left	40147	40135
	right	40147	40157
	left	40146	40136

الجدول2. تغير التواتر $\Delta f = f' - f$ بدلالة سرعة العربة

v (ms^{-1})	Δf (Hz)
−0.2	−23.5
−0.17	−20
−0.13	−16
−0.1	−11
0.1	10
0.13	15
0.17	18.5
0.2	24

$$\frac{f}{v} = 1.162 \frac{Hz}{cm\,s^{-1}}$$

تقدر القيمة الوسطية للتواترات المقيسة في حالة السكون في الجدول1 بنحو $f = 40165Hz$ ومنه نحصل على سرعة الصوت في الهواء $v = 346ms^{-1}$، في حين أن القيمة الواردة في المراجع $v = 346.3ms^{-1}$.

ملاحظة مهمة جداً

عندما يكون منبع الأمواج فوق الصوتية هو نفسه في حالة حركة، فإن ميل الخط البياني لتغير Δf بدلالة $1/v_S$ بحسب العلاقة (9b) يساوي $f\,v$. يتحقق هذا الأمر عندما يوصل الترجام الموصول بالعربة بخرج مولد الاهتزاز 40kHz كما في الشكلين 5 و 6 ويوصل الترجام الثابت (الكاشف) بخرج مضخم الاهتزاز AC (مع التأكد من أن الترجامين متقابلان تماماً، واختيار التضخيم المناسب بحيث تتجاوز سعة إشارة الخرج عتبة الدخول للعداد الرقمي).

ملحق 1

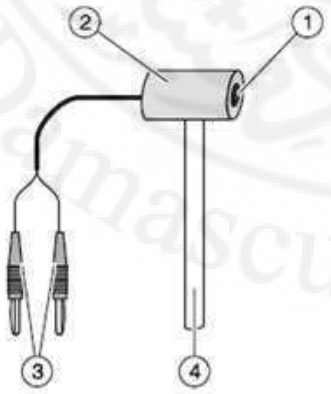
ترجام الأمواج فوق الصوتية

إن ترجام الأمواج فوق الصوتية لايبولد موديل 416000 $40kHz$ هو ترجام كهرضغطي piezoelectric transducer فوق صوتي، يعمل في الهواء الجوي. يستخدم في التجارب التي تتضمن أمواجاً فوق صوتية وهندسية. يمكن استخدام الترجام كمصدِر لأمواج الضغط الصوتية وكمستقبِل لها.

1. تعليمات الأمان

- يحفظ من الصدمات والكدمات impact
- لا تطبق عليه كمونات أعلى من $30V_{pp}$
- لا تشغّله في السوائل

2. وصف الترجام ومعطياته الفنية



الشكل 8

يتكون الترجام (الشكل8) من:

1. البلورة الكهرضغطية المصدرة للموجة فوق الصوتية، 2. الحافظة، 3. كابل مزدوج بقابسين $4\,mm$ لتلقيم البلورة بإشارة المولّد، 4. قضيب استناد

معطيات الترجام الفنية

يقدَّر تواتر تجاوب البلورة الكهرضغطية بنحو 40kHz، ويقدّر عرض عُصابتها بنحو 6kHz، وسعتها الكهربائية 2000pF في الترجام، الذي يوصل بمولّد الإشارة أو بمضخم الإشارة بكابل مزدوج مشترك المحور طوله متر واحد ويتضمن قابسين $4\,mm$، يبلغ قطر حافظته 27mm dia وطولها 40mm، وقطر قضيب الاستناد 10mm وطوله 20cm.

3. تشغيل الترجام

يوصى بمنابع الإشارة

- مولد الإشارة 40kHz، 416014
- مولد توابع الإشارة 51256

المشعر الذي يوصى باستخدامه في مستقبل الأمواج الصوتية

- راسم الاهتزاز مثلاً 575211
- المضخم AC 416013
- مقياس فولط مثلاً 531911

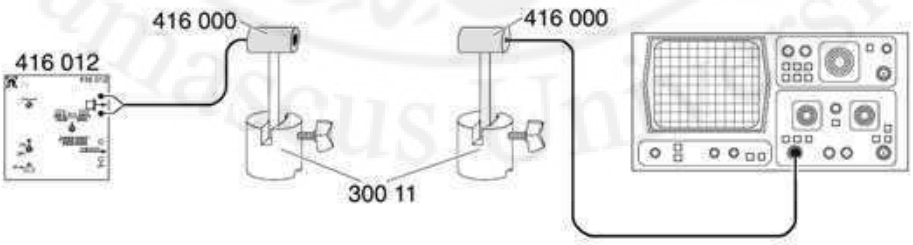
تعيين تواتر تجاوب الترجام

لدى استخدام الترجام فوق الصوتي كمنبع للأمواج فوق الصوتية، يتم توصيله إلى خرج المولد 416014. ويوصل براسم الاهتزاز لدى استخدامه مستقبلاً لأمواج الضغط الصوتية اهتزاز.

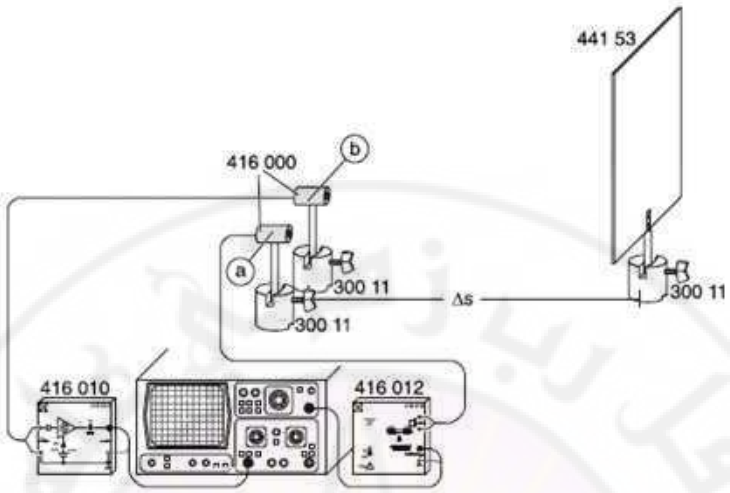
يجب في كلا الحالتين تأريض القابس الأسود.

يتم تعيين تواتر تجاوب الترجام فوق الصوتي بترتيب معدات التجربة وتوصيلها وفقاً للشكل9. تراقب الإشارة فوق الصوتية المستقبلة على الراسم وتجعل في قيمتها العظمى بإجراء تعديلات طفيفة على تواتر المولد، باستخدام مجزئ الكمون الدوّار على المولّد نفسه.

4. أمثلة عن التجارب الممكنة

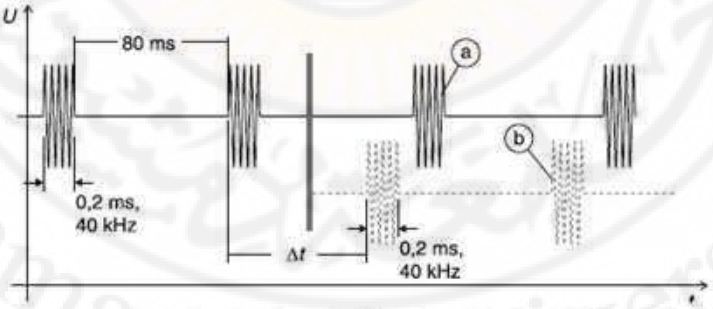


الشكل9. تجربة معدة لتوليف تواتر التجاوب



الشكل10a. شكل توضيحي لتجربة قياس الأعماق، a مرسل الأمواج، b المستقبل

مثال1. يظهر في الشكل10a الترتيب التجريبي لمسبار العمق الصوتي الذي يضم مرسلاً a ومستقبلاً b بالإضافة إلى مولّد إشارة يوصل بمرسل الأمواج ومضخم للإشارة يوصل بمستقبل الأمواج بالإضافة إلى حاجز عاكس للصوت وراسم للاهتزاز. ويظهر في الشكل10b ما يمكن أن يظهر على شاشة الراسم لنبضات إصدار متتالية كل $80ms$ والنبضات المرتدة المقابلة ومِنْ ثَمَّ تتعين سرعة الصوت باستخدام العلاقة $C = 2 \cdot \Delta S / \Delta t$، بالاعتماد على الفارق الزمني بين النبضتين الصادرة a والموجة المنعكسة b



الشكل10b. تمثيل تخطيطي لإشارة مسبار الأعماق على راسم الاهتزاز. تتعين سرعة الصوت باستخدام العلاقة $c = 2\Delta s / \Delta t$، بالاعتماد على الفاصل الزمني بين النبضة الصادرة (a) والموجة المنعكسة (b)

مثال2. يظهر الشكل11 الترتيب المستخدم لإيضاح انتشار الأمواج فوق الصوتية تجريبياً على سطح الماء مع عاكس للإزاحة.

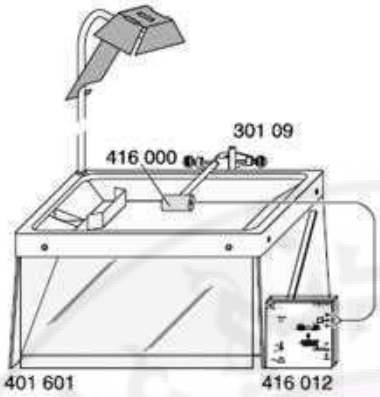
الملحق 2

مولد الاهتزاز 40kHz

يزودنا مولّد الاهتزاز لايبولد موديل 40kHz 416014 بكمونات AC تربيعية ويؤدي دور منبع الإشارة التي تلقّم لترجام الأمواج فوق الصوتية.

1. ملاحظات الأمان

- لا تشغل المولد إلاّ ببطارية 9V أو بمنبع التغذية 9.2V ذي القابس (53088). إذ إن تشغيل المولد بأي منبع آخر وبخاصة منبع للكمون المتناوب يؤدي إلى إتلافه.
- لا تصل أي كمون خارجي إلى مخرجيها (4) و (6)
- لا تصل أكثر من خمسة تراجيم فوق صوتية على التوازي إلى الخرج (4)
- يمكن إعداد هذا المولّد ليعمل بشكل مستمر أو نبضي لتمكين التجارب التي تعتمد على الأمواج الصوتية الميكانيكية والهندسية بالإضافة إلى التطبيقات التقنية كقياس الأعماق والقياسات فوق الصوتية.



الشكل11. الكشف عن الأمواج فوق الصوتية في حوض الأمواج المائية

2. وصف مولد الاهتزاز، مكوناته والمعطيات الفنية (الشكل12)

(1) مفتاح دفع واصل / فاصل.

(2) دليل ضوئي يضيء في أثناء تشغيل المولد، الذي يتوقف آلياً عن العمل بعد نحو 45min من التشغيل.

(3) مجزئ للكمون للتحكم بتواتر مولّد الإشارة.

(4) مقبسان 4mm لخرج مولّد الإشارة يوصلان بترجام الأمواج فوق الصوتية

(5) مبدل وظيفي (يبدّل إشارة خرج المولّد (4) بين المستمرة في الوضعية I والنبضية في الوضعية II.

(6) مقبسان 4mm لخرج القدح (6) في مولّد الإشارة، يوصلان براسم الاهتزاز أو بالعداد الرقمي.

(7) مقبس لقابس وحدة التغذية $9.2V$ 53088

(8) حجرة لبطارية $9V$ (68545)، كبديل لوحدة التغذية التي توصل بالمقبس.

المعطيات التقنية

منبع الكمون: من 8.5VDC إلى 9.5VDC، التيار المستهلك نحو $7.5mA$

مجال التواتر: يمكن تغييره من $35kHZ$ إلى $50kHz$ بمجزئ الكمون الدوّار (3)

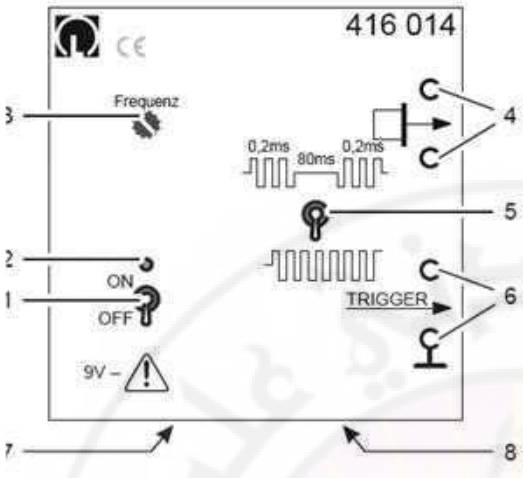
خرج القدح (6)، إشارة كمون AC تربيعية الموجة $9V_{pp}$

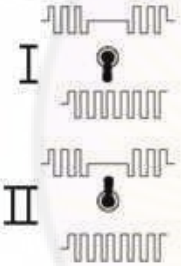
خرج المولد: إشارة كمون AC تربيعية الموجة $18V_{pp}$ لتلقيم عدد من التراجيم فوق الصوتية يصل إلى خمسة تراجيم موصولة على التوازي. تكون إشارات الخروج إمّا مستمرة وإمّا نبضية، مدة النبضة نحو $0.2ms$ والفاصل بين النبضات نحو $80ms$. أبعاد العلبة $11.5cm \times 11.5cm \times 3cm$ وكتلتها $0.22kg$.

3. تشغيل المولد

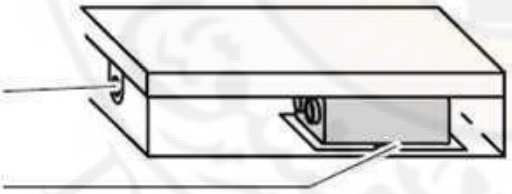
1.3. كمونات التشغيل

يمكن تشغيل المولد ببطارية أو بوحدة تغذية كما ذكرنا أعلاه. وإن الانفصال الآلي لمنبع الكمون يمنع استهلاك التيار من البطارية دون جدوى.





الشكل12a. مولد الإشارة



الشكل12b. منظر جانبي لمولد الإشارة يظهر فيه كل من حجرة البطارية ومقبس التغذية

يمكنك استخدام بطارية جافة $9VDC$ كمنبع لكمون التغذية (من النوع IEC 6F22 أو من النوع IEC 6 LR61)، أو بطارية مطابقة من Ni-Cad قابلة للشحن أو وحدة التغذية المذكورة أعلاه.

2.3. وصل الترجام فوق الصوتي

يوصل ترجام الأمواج فوق الصوتية بمخرج مولد الاهتزاز (4) على الشكل12a.

يتم تعيين تواتر التجاوب لترجام الأمواج فوق الصوتية باتباع ترتيب المعدات المبين في الشكل9 (الملحق1)

تراقب الإشارة المستقبلة على راسم الاهتزاز. وللحصول على السعة العظمى للإشارة الكهربائية على الراسم، تجرى تعديلات طفيفة على التواتر باستخدام مجزئ الكمون الدوّار (3) على مولد الاهتزاز.

3.3. وصل راسم الاهتزاز أو العداد

يوصل راسم اهتزاز لمراقبة الإشارة النبضية (مسبار الأعماق Sounder) أو العداد لقياس تواتر تجاوب ترجام الأمواج فوق الصوتية (الإشارة المستمرة) عند مخرج القدح (6) (الشكلان 10 و11 في الملحق1).

الملحق 3

المضخم AC

إن المضخم AC لايبولد موديل 416013 هو مضخم حساس للمكروفونات (الأصوات الضعيفة) لدى الكشف عن الأمواج فوق الصوتية بالتلازم مع ترجام للأمواج فوق الصوتية كمستقبل. يمكن وصل خرج المضخم بمقياس للكمون AC كراسم الاهتزاز المهبطي أو بمقياس للكمون DC (كالمقياس ذي المؤشر أو المسجل أو حاسب مع وصلة بينية).

1. ملاحظات الأمان

- لا تستخدم المضخم إلاّ بمنبع تغذية ملائم (انظر الفقرة 1.3)
- إذا رغبت بتشغيل المضخم عن طريق منبع التغذية الرئيسي لا تستخدم إلّا وحدة التغذية بالقابس (53088)
- لا تطبق أي كمون خارجي عند المخرج (6)
- عند وصل مقاييس الكمون AC، تأكد أنها تنسجم مع تواتر الاستجابة (من $20kHz$ إلى $40kHz$).

2. مكونات المضخم ووصفه والمعطيات التقنية (الشكل13)

1.2. مكونات المضخم

يتكون من مضخم AC (416013) ببطارية $9V$ (58545)

2.2. وصف المضخم

(1) قاطع واصل/ فاصل لكمون التغذية. يتوقف مضخم الإشارة آلياً عن العمل بعد نحو 45min من لحظة تشغيله.

(2) مشعر يضيء لدى تشغيل مضخم الإشارة.

(3) مقبسان 4mm لمدخل المضخم يوصلان بترجام الأمواج فوق الصوتية (416000).

(4) مجزئ للكمون للتحكم في ربح المضخم.

(5) مبدل وظيفة خرج المضخم.

حيث يجعل في الوضعية "signal" "~" لدى استخدام مقاييس الكمون AC (كالراسم مثلاً)، وفي الوضعية "level" "=" لدى استخدام مقاييس الكمون DC (كمقياس بمؤشر مثلاً أو مسجل أو وصلة بينية بالحاسب).

(6) مقبسان $4mm$ لخرج المضخم.

(7) حجرة للبطارية.

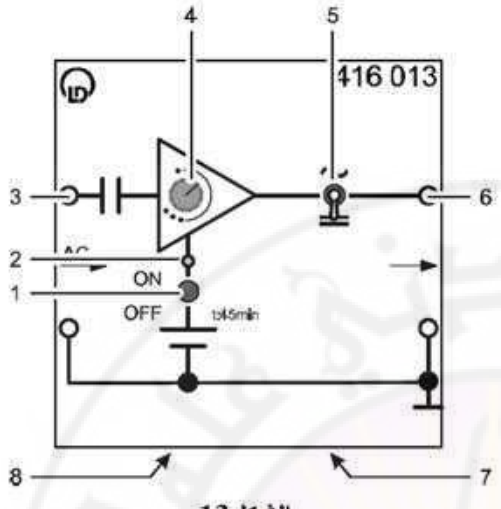
(8) مقبس لوصل وحدة التغذية كبديل عن البطارية.

3.2. المعطيات التقنية

جهد منبع التغذية من 5 إلى 15VDC، التيار المستهلك نحو 7.5mA، ربحه يتغير باستمرار من 10x إلى 1000x، مجال التواتر $20kHz$ إلى $50kHz$، ممانعة إشارة الخرج "~" من $\leq 1k\Omega$ من أجل $f \geq 20kHz$، الخرج الأعظمي $4V_{pp}$، ممانعة مستوى الخرج "=" $\leq 1\Omega$، الخرج الأعظمي $4V$، أبعاد الحجرة $11.5cm \times 11.5cm \times 3cm$.

3. تشغيل المضخم

1.3. يمكن تشغيل المضخم باستخدام



الشكل13

بطارية جافة أو بطارية قابلة للشحن Ni-Cd، كما يمكن ذلك باستخدام منبع تغذية بقابس. يؤدي التوقف الآلي للمضخم إلى منع استهلاك الطاقة دون جدوى.

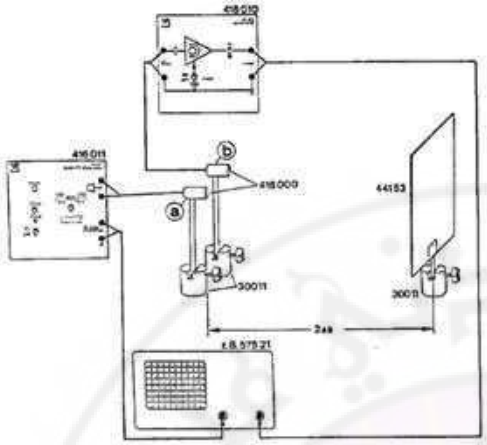
2.3. التحكم في ربح المضخم

يمكن التحكم بربح المضخم بحسب ماتتطلبه شروط التجربة باستخدام مجزئ الكمون (4). يستخدم، في حال الضرورة، راسم الاهتزاز للتأكد من عدم تجاوز كمون الخرج القيم المطلوبة.

3.3. وصل جهاز قياس كمون AC (كراسم اهتزاز مثلاً)

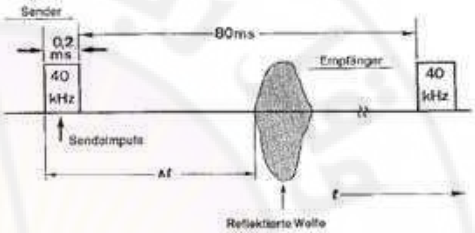
يجعل مبدل الوظيفة (5) على الوضعية "signal" ويتم اختيار مجال كمون AC الصحيح على جهاز القياس

4.3. يوصل مقياس الكمون DC (مقياس بمؤشر أو مسجل بوصلة حاسب بينية). يجعل مبدل الوظيفة (5) على الوضعية "level"= ويتم اختيار مجال الكمون DC الصحيح على جهاز القياس.

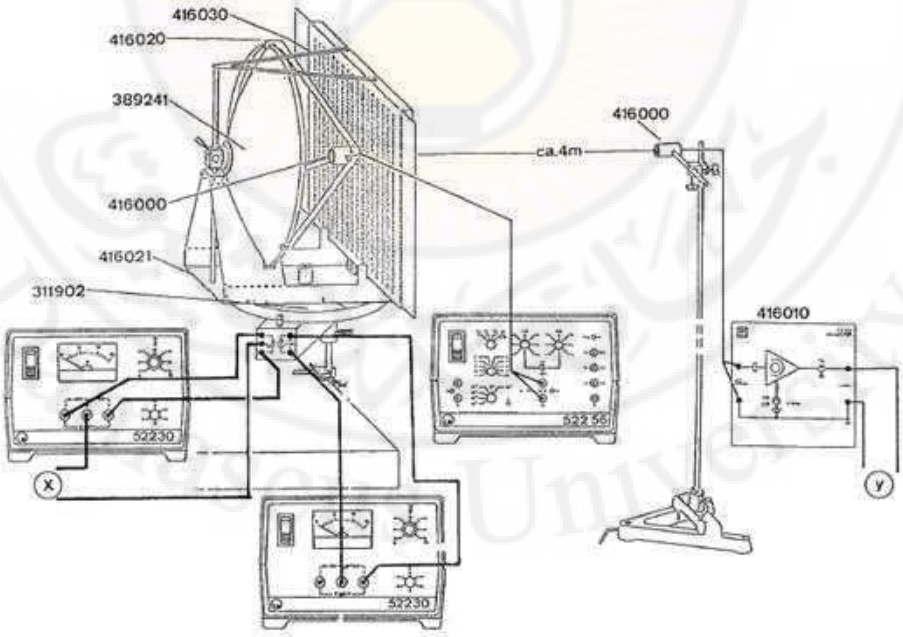


الشكل14. تجربة مهيأة لقياس الأعماق. (a) مرسل الأمواج، (b) مستقبل الأمواج

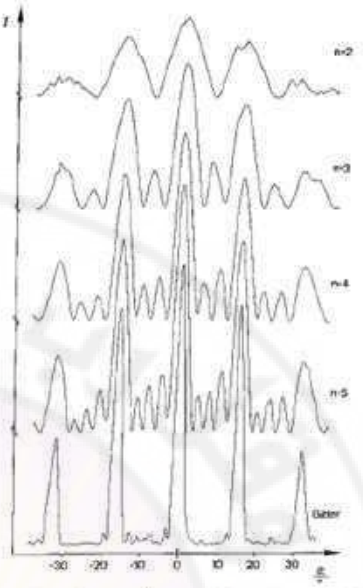
أمثلة عن التجارب



الشكل15. تمثيل تخطيطي على الراسم لعمق المسبار. تتعين سرعة الصوت باستخدام العلاقة $c = s/t$ بالاعتماد على فارق الزمن بين النبضة الصادرة (a) والموجة المنعكسة(b)



الشكل 16. تجربة معدة لدراسة الانعراج عند شقوق وشقوق مضاعفة وشبكات



الشكل17. نتائج القياس في عدة تجارب انعراج باستخدام ترجام الأمواج فوق الصوتية 40kHz عند شق واحد ($n=1,2,3,4,5$) وكذلك عند شبكة بالبعد الشقي نفسه

الملحق4

العربة بمحرك كهربائي

إن العربة التي تستطيع أن تتحرك على السكة المعدنية الدقيقة (46081) أو على أي سطح تسمح بتجارب الحركة المنتظمة وبخاصة المناسبة لمصطلح السرعة. إذ إن السرعة في الاتجاهين الأمامي والخلفي متحول متغير باستمرار.

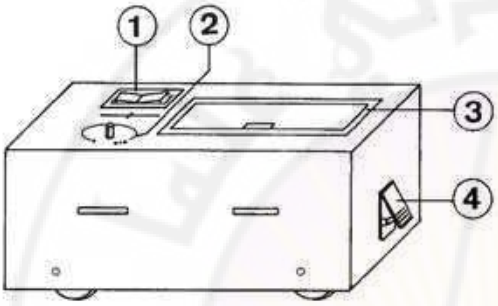
1. ملاحظة أمان

أطفئ محرك العربة بعد استخدامها توفيراً للبطاريات. راقب قطبية البطاريات لدى إدخالها.

2. وصف العربة ومعطياتها التقنية

العربة ذات المحرك الكهربائي والعجلة المسننة

1) قاطعة ثلاثية الوضعيات: للحركة الأمامية والإيقاف والحركة الخلفية.



الشكل18. العربة

2) مجزئ كمون للتحكم بسرعة العربة من 5 إلى $20\,cm/s$

3) حجرة تتسع لبطاريتين (68544) توصلان على التسلسل: $3V$ للمحرك الكهربائي (إن الكمون الأخفض للبطاريات ينتج عنه سرعة عظمى منخفضة).

4) ملقط لتثبيت ورقة تسجيل ممعدنة، **العيار** gauge: $3.5\,cm$ (يلائم السكة المعدنية الدقيقة).

أبعادها: $12\,cm$ و $6\,cm$ و $5\,cm$، **الكتلة:** $175\,gm$.

3. أمثلة تطبيقية

القياس المباشر للبعد والزمن

- باستخدام ساعة الإيقاف أو بالحاسب بالاستعانة بالحواجز الضوئية (راجع الملحق6)، يقاس الزمن t الذي تستغرقه العربة لتنتقل مسافة معينة S، وتحسب السرعة $v = S/t$.
- يتم تحديد المسافات ΔS التي تنتقلها العربة في فترات زمنية متساوية Δt. فتكون النتيجة (ثابت) $\Delta S/\Delta t = v$.
- يتم تحديد المسافات التي تنتقلها العربة في أزمنة مختلفة t. والنتيجة أنه من خلال المنحني البياني $S \sim t$ أو (ثابت) $S/t = v$

قياس المسافة والزمن باستخدام مسجل الزمن (33718)

- تثبت الورقة الممعدنة إلى ملقط العربة (4) ويركّب عليها مسجل الزمن (تتبع التعليمات)
- تجعل علامة التواتر عند القيمة $10Hz$
- تقاس المسافات بين العلامات (المتساوية الأبعاد) ثم تعيّن سرعة العربة.

الملحق 5. العدّاد الرقمي

صمم العداد الرقمي لايبولد موديل (57548) لكي يستخدم في المحاضرات وفي التجارب الإيضاحية وفي التمارين العملية.

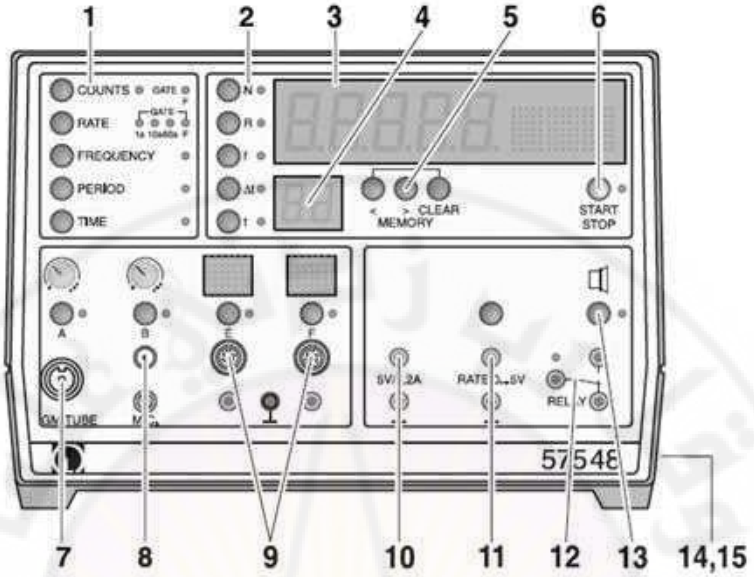
تهيأ جميع البرامترات في هذا العدّاد عن طريق أزرار تقع في لوحته الأمامية، تدل الثنائيات المصدرة للضوء على الإعدادات الفعّالة الموافقة لحظة إضاءتها. يعني هذا الأمر أنه بإمكانك استخدام هذا العدّاد بسهولة وبشكل حدسي من دون أن تبحث عن أي من وظائفه قبل استخدامه.

يمكن لهذا العدّاد أن يحفظ عدداً كبيراً من القيم المقيسة يصل إلى 99 قيمة مقيسة. يمكن الوصول إلى هذه القيم الواحدة تلو الأخرى بعد إجراء عملية القياس، أو يتم نقلها إلى حاسب عن طريق وصلة بينية تسلسلية RS232، تقع على اللوحة الخلفية للعدّاد، المزود بالبرمجيات الموافقة.

ملاحظة الأمان. يمكن أن تتعطل وظيفة هذا العداد الرقمي بالكهرباء الساكنة أو برقّة كمون المنبع الرئيسي. ولذا تتخذ، في حال الضرورة، الإجراءات الوقائية من الانفراغ الكهربائي الساكن أو يستخدم مرشح للمنبع الرئيسي.

1. وصف العداد ومعطياته الفنية

- يضم شاشة عرض رقمية بخمسة أرقام ارتفاعها 25mm (بالإضافة إلى منطقة تشير إلى الوحدات المستخدمة: Imp (عدد النبضات)، و s^{-1} و $\min^{-1}$ و Hz و kHz و rpm و s و ms).



الشكل19. العداد الرقمي

- عدّاد للتخزين العالي برقمين ارتفاعه 12mm.
- منطقتا عرض للحواف المنتقاة ونمطها.
- اتصال مباشر بأنبوب العدّاد بكمون يمكن تغييره من 0V إلى 640V.
- مدخل BNC ($1M\Omega$) لقياسات المعدل أو التواتر أو الدور (التواترات تصل إلى 2MHz) بعتبة قدح يمكن تغييرها (من 0.1 إلى $5V$) كما يمكن تبديل اقترانها (بـ DC أو بـ AC).
- مدخل مكروفون (مقبس $3.5mm$).
- مدخلان للحاجز الضوئي (عن طريق مقبسين $4mm$) في حالة القياسات المتزامنة لكل من التواتر أو الدور أو الزمن (المقدرة الفاصلة الزمنية μs، كما يمكن اختيار الحواف).
- مخرج كمون منفصل ($5V/200mA$).
- خرج المسجل لقياسات المعدل عند المدخل A.
- مكبر صوت داخلي built-in speaker (قابل للقطع).
- قاطعتان مبدلتان تتزامنان مع بدء القياس.
- يخزن حتى 99 قيمة مقيسة.
- وصلة بينية تسلسلية معزولة كهربائياً (RS232) لوصل الحاسب.
- برنامج قياس وتقييم صالح من أجل الوندوز 95 والويندوز NT (تتوافر التحديثات على موقع الشركة.

2. عمل العداد الرقمي

1. انتقاء المقدار المقيس، 2. انتقاء الكمية/ الوحدة التي يجب عرضها، 3. عرض القيمة المقيسة، 4. عداد التخزين، 5. مفتاحان للدخول إلى القيم المحفوظة storage replay keys، 6. زر تشغيل العداد وإيقافه، 7. مدخل لأنبوب العداد بمجزئ للكمون العالي، 8. مدخل للتواتر (BNC) والوصل بالمكروفون) بمجزئ للكمون يتحكم في عتبة القدح، 9. مدخلا حاجزين ضوئيين (عن طريق مقابس $4mm$)، 10. مخرج ثابت الكمون، 11. مخرج تسجيل لقياس المعدل مع مجزئ للكمون لتغيير المجال ، 12. قاطعتان تبدلان فيما بينهما مع بدء القياس، 13. مفتاح بالضغط لمكبر الصوت الداخلي، 14. وصلة بينية تسلسلية $RS232$ ، 15. منبع لكمون للمضخم المتقدم الحساس.

1.2. الكمية المقيسة (الجزء العلوي الأيسر من لوحة التحكم)

يمكنك اختيار كمية القياس المرغوبة في المجال (1) من لوحة التحكم. غير أنه إذا كان يجري قياس كمية معينة أصلاً يجب عليك إيقاف ذلك قبل أن تتمكن من تغيير المقدار المقيس. إذ يعود المقدار المعروض السابق إلى قيمته الأصلية لدى اختيار مقدار جديد للقياس.

تتوافر كميات القياس التالية:

المقدار المقيس	المدخل	العرض (بخياراته)
العد (نبضات)	A أو B أو E (أو F في حالة البوابة الخارجية)	N مقدرة بالنبضة
المعدل	A أو B أو E (أو F في حالة البوابة الخارجية)	R (s^{-1} أو $\min^{-1}$ أو $N/pulses$ أو $\Delta t/s$)
التواتر	B أو E أو F	f/Hz (أو f/kHz أو f/rpm)
الدور	B أو E أو F	$\Delta t/s$ (أو $\Delta t/ms$ f/kHz أو f/rpm)
الزمن	E أو F	t/s (أو t/ms أو $\Delta t/s$ أو $\Delta t/ms$)

2.2. مداخل العدّاد (في الجزء السفلي الأيسر من لوحة التحكم)

بعد اختيار المقدار المطلوب يمكن تشكيل المداخل بحسب المطلوب، كما هو مبين في الجدول أعلاه. أضف إلى ذلك أنه يمكن اختيار جهد أو كمون أنبوب العداد عند المدخل $A(7)$ (الذي يظهر في أثناء التغيير)، كما يمكن اختيار عتبة القدح عند المدخل $B(8)$ (التي تظهر في أثناء التغيير) مقترنة إمّا بالكمون المستمر وإمّا المتناوب (بـ DC أو بـ AC وذلك بعد ضغط المفتاح B). يمكن أيضاً اختيار حواف القياس عند المدخلين E و$F(9)$ (التي تظهر في الزمن الحقيقي في عناصر الإظهار الموافقة). تتوافر عدة خيارات لتهيئة الحافة (كالحافة الموجبة أو الحافة السالبة أو النبضة المضيئة أو النبضة العاتمة أو المستوى المرتفع أو المستوى المنخفض أو ساعة الإيقاف، p= pendulum أي في الحالة التي تحصى فيها حواف أخرى. لا يمكن إجراء القياسات المتزامنة عند المداخل A و B و E. ولتبسيط العمل يبدل العداد آلياً بين المداخل عندما تسجل نبضة معينة عند مدخل آخر. بإمكانك تثبيط هذا التبديل switchover الآلي للعداد بانتقاء المداخل يدوياً.

3.2. عرض المقدار المقيس (الجزء العلوي الأيمن من لوحة التحكم)

بعد أن يتم اختيار المقدار المقيس، تتهيأ شاشة العرض إلى المقدار المقيس الظاهر في الجدول. إذ يمكن بحسب الجدول تبديل شاشة العرض أيضاً إلى كمية مختلفة (من R إلى N مثلاً).

تبدأ جميع القياسات وتتوقف باستخدام مفتاح البدء / الإيقاف (6). فإذا لم يجر أي قياس حتى الآن، لا تظهر أي قيمة مقيسة على شاشة العرض (تكون حقول الأعداد مطفأة في شاشة العرض). ولا يمكن تغيير شاشة العرض إلاّ في أثناء القياس (إلى وحدة مقدار مقيس آخر أو على دخل فعّال آخر). فإذا حاولت أن تقوم بتغيير ممنوع في أثناء القياس، يظهر سهم فوق مفتاح البدء / الإيقاف يذكّر بأنه يترتب إيقاف القياس أولاً.

في أثناء القياس تحفظ القيم المقيسة في الذاكرة الداخلية ويزداد عداد الحفظ عدة واحدة وفقاً لذلك. ولعدم احتواء شاشة عرض عداد الحفظ إلّا على رقمين فإن ظهور نقطة عشرية بعد الرقم الثاني يدل على امتلاء العداد.

يستمر إجراء القياس بعد امتلاء الذاكرة، أي بعد حفظ 2000 قيمة، دون أن يتم حفظ قيم

جديدة. يعرض عداد الحفظ في هذه الحالة خطين two dashes. عندما يتوقف القياس يبدي عداد الحفظ آخر قيمة تم حفظها. يمكنك استعراض كل القيم المقيسة نحو الخلف من خلال > وإلى الأمام من خلال<. وإن عد التخزين الموافق (4) يومض في أثناء قراءة الخرج readout. يمكنك أن تمسح الذاكرة بالضغط على CLEAR و > في آن معاً. أمّا الضغط على CLEAR فقط يمسح القيمة الحالية.

تتوقف الثنائيات الضوئية للمداخل وعناصر عرض الحواف، في أثناء القياس وأثناء قراءة خرج الذاكرة، عن عرض الإعدادات المختارة؛ بل تعرض المداخل والحواف التي توافق القيمة المقيسة المعروضة حالياً. عندما يتطلب الأمر مثلاً قياس الحواف الصاعدة عند المدخلين E و F فإن هذين الأخيرين يبديان هذه الحواف قبل القياس. غير أنه لا يشار في أثناء القياس ولدى قراءة خرج الذاكرة إلّا إلى الحافة التي توافق المرة المعروضة حالياً.

وبما أن الثنائيات الضوئية للمداخل وعروض الحواف تستعمل أيضاً في قراءة الخرج، فليس ممكناً تغيير إعداداتها مباشرة. وإن أي محاولة لتغيير هذه الإعدادات (بالضغط على A أوB أوE أوF) ينهي قراءة الخرج وتظهر القيم الحالية مرة أخرى. يمكنك في هذه الحالة تغيير الإعدادات بحسب الرغبة.

4.2. مخارج العداد (الجزء السفلي الأيمن من لوحة التحكم)

يمكنك تفعيل مكبر الصوت الداخلي بالضغط على المفتاح (13). فتسمع كل نبضة مسجلة على شكل نقرة Click. كما يظهر معدل العد المقيس عند المدخلA على مخرج التسجيل (11) على شكل كمون من 0 إلى 5V . يمكن تهيئة الكمون عند هذا المخرج باستخدام المفتاح الموافق (11) على خطوات من 10/s/V (كل1V يقابل عشر نبضات في الثانية) إلى 10,000/s/V (كل 1V يقابل 10,000 نبضة في الثانية). يظهر الإعداد الحالي على شاشة العرض بالضغط على هذا المفتاح. وبتكرار ضغط هذا المفتاح يتغير هذا الإعداد على شكل تزايدات. يتم حساب القيمة الوسطية لكمون الخرج إلكترونياً. وهكذا يتغير باستمرار وليس على شكل خطوات متقطعة كالقيمة الرقمية التي تظهر لقياس المعدل.

تنقطع الطاقة عن مرحِّل التبديل changeover relay (12) لحظة بدء كل

قياس ويستردها ثانية لدى توقف القياس. إن هذا الأمر يجعله مثالياً للتحكم في مغنطيس التثبيت في حالة قياسات التوقيت timing measurements.

يتوافر أيضاً مخرج كمون ثابت (10) (5V/200mA) لأي غرض، لتأمين حواجز ضوئية بسيطة مثلاً.

تحوي اللوحة الخلفية وصلة بينية تسلسلية (14) لإخراج المعطيات إلى حاسب وخرج كمون إضافي (15) مناسب للمضخم المتقدم الحساس موديل 55993 مثلاً.

3. أمثلة

1.3. عداد النبضات (counts)

بإمكانك أن تختار بين المداخل A وB وE. يبدأ عد النبضات عندما تضغط على مفتاح البدء / الإيقاف. إن كل نبضة تزيد قراءة العداد بمقدار 1. عندما يتوقف القياس، يتوقف العداد وتحفظ قياسات العد في الذاكرة. وإن إعادة بدء القياس تعيد تهيئة العد إلى الصفر وتبدأ عداً جديداً.

يمكن خلافاً لذلك التحكم بعد النبضات بعد البدء عن طريق إشارة خارجية عند المدخل F (البوابة F). في نهاية سلسلة القياس تستطيع أن تقرأ خرج الذاكرة باستخدام الإشارة > و < ومن ثم مسحها باستخدام > + CLEAR . كما تستطيع إخراج النبضات المسجلة عن طريق مكبر الصوت.

2.3. المعدل

عندما تختار وظيفة قياس المعدل، يجب عليك أيضاً أن تهيأ البوابة الزمنية المرغوبة ($1s$ أو $10s$ أو $60s$ أو عبر بوابة خارجية عن طريق F). يمكنك أن تختار بين المداخل A وB وE. وعند استخدام بوابة المدخل F اختر شكل النبضة المرغوب للبوابة المفتوحة باستخدام هذا المدخل.

يبدأ قياس المعدل ويتوقف بالضغط على زر البدء/ الإيقاف. يتم عرض المعدل المقيس وحفظه في نهاية كل بوابة زمنية.

يمكنك أن تختار بين N وR وΔt. لتغيير الوحدة المعروضة (من s^{-1} إلى $\min^{-1}$ مثلاً) ما عليك إلّا الضغط على المفتاح الموافق مرة ثانية.

يمكنك إخراج النبضات المسجلة عن طريق مكبر الصوت الداخلي. يتوافر المعدل المقيس على شكل كمون عند خرج المسجل RATE.

3.3. التواتر

يمكنك أن تختار بين المداخل B وE و F. يسمح المدخلان B/F أو E/F أيضا

بقياسات ثنائية القناة. كما يسمح لك المدخلان E و F أيضاً بتحديد فيما إذا كان يجب عد حواف أخرى (تبين الشاشة الحرف p لنمط النواس).

يبدأ قياس التواتر ويتوقف بالضغط على زر البدء/ الإيقاف. يتم عرض وحفظ التواتر المقيس كل ثانية. وعندما يتم القياس عند مدخلين في نفس الوقت (مثل Bو E و F) يحفظ التواتران كلاهما، ويمكنك تبديل العرض بين التواترين باستخدام المفتاحين E و F.

يمكنك أن تختار أيضاً وحدة التواتر المعروض بالضغط على المفتاح المقابل. يمكنك الاختيار بين الوحدات Hz و kHz و rpm (عدد الدورات في الدقيقة). تذكّر عند عرض قيم rpm أن المقدرة الفاصلة للعرض ليست إلّا $100rpm$ (بسبب قصر زمن القياس الذي يساوي $1s$).

4.3. الدور

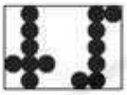
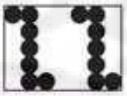
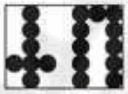
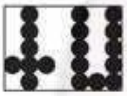
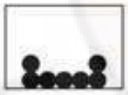
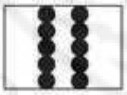
يمكنك أن تختار بين المداخل Bو E و F. تسمح المداخل B/F أو E/F أيضاً بالقياسات الثنائية القناة. يسمح لك المدخلان E و F أيضاً بتحديد فيما إذا كان هناك حواف أخرى يجب عدها (حيث يظهر الحرف p على الشاشة الذي يدل على التذبذب). يبدأ قياس الدور ويتوقف بالضغط على مفتاح البدء/ الإيقاف. يعرض العداد الدور المقيس ويحفظه. وعند القياس عند مدخلين في الوقت نفسه Bو Eو F مثلاً، يتم حفظ الدورين كليهما. يمكنك تبديل العرض باستخدام المفتاحين E و F.

يمكنك أن تختار بين عرض Δt و f. لعرض f يتحول الدور المقيس بشكل آلي إلى تواتر. ولتغيير الوحدة المعروضة (من Hz إلى kHz مثلاً) ما عليك إلّا الضغط على المفتاح المقابل مرة ثانية. لاحظ أن قياس الدور أقل دقة من قياس التواتر في حالة التواترات التي تزيد على $1kHz$. إن نمط الدور لا يزودنا بأي قيم مقيسة عند التواترات التي تزيد على نحو $10kHz$.

5.3. ساعة الإيقاف (الزمن)

يمكنك أن تختار بين المدخلين E و F. يسمح إعداد المدخل E باختيار واحد من بارامترات الحواف الممكنة السبعة (الحافة الموجبة والحافة السالبة والنبضة المضيئة والنبضة العاتمة والمستوى المرتفع والمستوى المنخفض وساعة الإيقاف). أما المدخل F فلا يمرر إلّا الحواف التي تنسجم مع المدخل E.

يبين الجدول التالي رموز الحواف المعروضة لقياس الأزمنة بدلالة المقادير المعروضة.

Symbol for t	displayed time	Symbol for Δt	displayed time difference
	Start until rising edge		Between 2 edges (E/E or E/F)
	Start until falling edge		Between 2 edges (E/E or E/F)
	Start until high pulse		Long high
	Start until low pulse		Long low
	Time for all high levels (additive)		
	Time for all low levels (additive)		
	(intermediate time	clock running)	
	Pause		

Damascus University

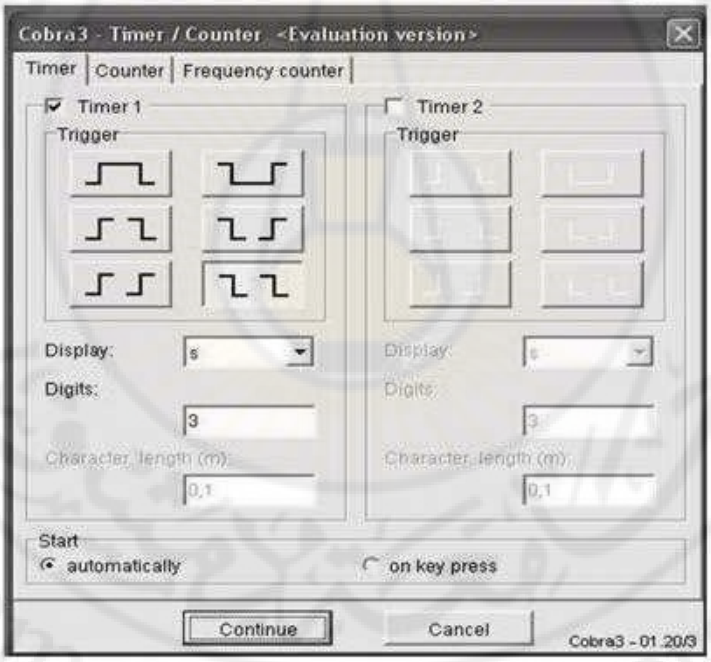
الملحق 6

تتم تهيئة سرعة العربة من خلال مجزئ الكمون الدوار الموجود على العربة ويتم وضع الحاجزين الضوئيين بحيث تكون المسافة بين منتصفهما تساوي نصف متر .

يتم تشغيل برنامج measure ثم الضغط على file ثم new measurement أو الضغط على أيقونة القياس الحمراء مباشرة ثم اضغط continue ثم اختر timer counter كما هو موضح في الشكل مع اختيار نفس المعطيات الموجودة في الشكل نفسه.

اضغط continue وشغل العربة ولاحظ كيف يسجل البرنامج الزمن الذي تستغرقه لتعبر المسافة بين الحاجزين.

قم بإيقاف العربة ثم احسب سرعتها.



التجربة (15)

نواس الفتل الحلزوني

الاهتزازات الدورانية الحرة والمتخامدة

1. هدف التجربة

- قياس سعة الاهتزازات الدورانية لنواس الفتل الحلزوني بدلالة الزمن.
- تعيين كل من ثابت تخامد السعة δ الذي يمثل نسبة سعة معينة للاهتزاز إلى السعة التي تليها، وثابت التخامد في واحدة الزمن γ الذي يمثل مقلوب الزمن اللازم لتهبط سعة الاهتزاز إلى $1/e$ من قيمتها الابتدائية، والتخامد في دور واحد للاهتزاز Λ، ويساوي اللغارتم الطبيعي لنسبة سعة معينة للاهتزاز إلى السعة التي تليها.
- دراسة الانتقال من حالة الاهتزازات الضعيفة التخامد إلى الحالة الحدية.

2. المبدأ النظري

تعد الاهتزازات الدورانية حالة خاصة من نماذج الاهتزازات الميكانيكية، حيث يمكن وصف اهتزاز النواس المركب ونواس الفتل الحلزوني بتغير الزاوية. يمكن وصف تحريك كتلة مثبتة في نهاية نابض حلزوني (إذ يرتبط طول النابض الحلزوني بالزاوية التي تدورها نهايته الحرّة) بصورة مشابهة لكتلة معلقة في نهاية نابض لولبي ليحل الانزياح الزاوي متحولا مستقلا مكان الانزياح الخطي، فنحصل على معادلة حركة توافقية، من شأن هذه المعادلة أن تسمح بدراسة معظم الظواهر المهمّة التي تحدث في كل أنواع الاهتزازات. يمكن بالإضافة إلى الهزاز التوافقي ذي الاهتزازات الحرة المتخامدة تحقيق هزاز لا توافقي.

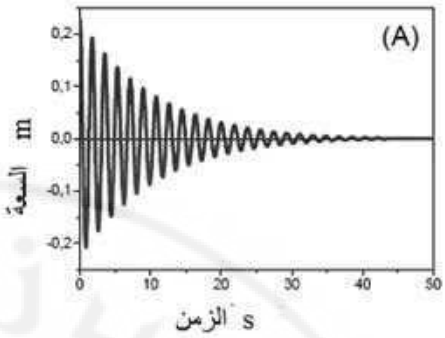
يمكن التعبير عن الاهتزازات الحرة المتخامدة لجملة اهتزازية (دورانية) بالمعادلة التفاضلية:

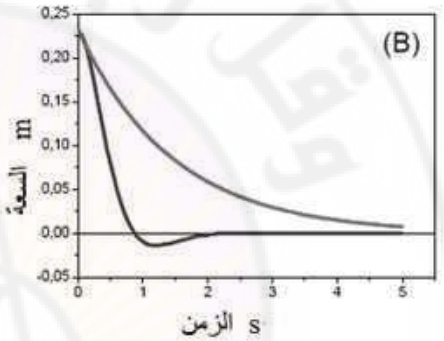
$$J\frac{d^2\theta}{dt^2}+r\frac{d\theta}{dt}+D\theta=0 \quad (1)$$

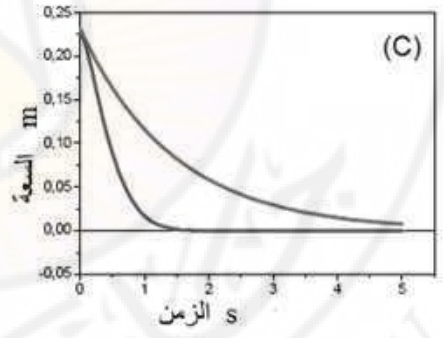
حيث J عزم عطالة النواس، D ثابت إرجاع النواس، r معامل التخامد (معامل الاحتكاك)، θ زاوية الدوران. بتقسيم العلاقة (1) على J نحصل على:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2}+2\gamma\frac{d\theta}{dt}+\omega_0^2\theta=0 \quad (2)$$

حيث $\gamma=r/2J$ ثابت التخامد ، في حين أن $\omega_0=\sqrt{D/J}$ يمثل التواتر الطبيعي للاهتزازات غير المتخامدة.







الشكل1. تمثيل تخطيطي لمختلف منحنيات الاهتزاز المتخامد

A) حالة التخامد الضعيف $\omega_0^2 > \gamma^2$ **(تغير الإزاحة الزاوية بدلالة الزمن بشكل أسي)**

B) حالة التخامد الشديد $\omega_0^2 < \gamma^2$ **(المنحني السفلي) مقارنة بالاهتزاز الضعيف التخامد (المنحني العلوي)**

C) الحالة الحدية اللادورية $\omega_0^2 = \gamma^2$ **(المنحني السفلي) مقارنة بالحالة الضعيفة التخامد (الخط العلوي)**

يمكن إعطاء حل المعادلة (2) بالشكل

$$\theta(t) = \theta_0\, e^{-\gamma t} \cos \omega t \qquad (3)$$

حيث $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$ التواتر الزاوي للاهتزازات المتخامدة، و γ ثابت التخامد الأسّي، ω_0 التواتر المميز للجملة غير المتخامدة، و θ_0 زاوية الدوران الابتدائية في اللحظة $t = 0$.

نرى من العلاقة (3) أن سعة الاهتزاز تتناقص بعامل السعة $e^{-\gamma t}$ (الشكل1A) ومِنْ ثَمَّ تتناقص السعة بعد زمن قدره $t = 1/\gamma$ بمقدار $1/e$ من قيمتها الابتدائية θ_0. أضف إلى ذلك أن العلاقة (3) تتبع النسبة بين سعتين متتاليتين على النحو:

$$\frac{\theta_n}{\theta_{n+1}} = \delta = e^{\gamma T} \qquad (4)$$

حيث T دور الاهتزاز، δ ثابت تخامد السعة، $\Lambda = \gamma T$ التخامد اللغارتمي:

$$\Lambda = \ln \delta = \gamma T = \ln \frac{\theta_n}{\theta_{n+1}} \qquad (5)$$

غير أنه بحسب العلاقة (3) لا يحدث الاهتزاز إلّا عندما يكون لعلاقة التواتر الزاوي $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$ جذر موجب (الشكل1A) أي عندما يكون $\omega_0^2 > \gamma^2$.

أما إذا كان $\omega_0^2 < \gamma^2$ فيكون الحل من الشكل:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\gamma t}(e^{\omega t} + e^{-\omega t}) \qquad (6)$$

تقترب سعة الجملة المهتزة في هذه الحالة من وضعية التوازن بشكل مماسي لمحور الزمن بعد اهتزازة واحدة (حالة التخامد الشديد: المنحني السفلي من الشكل 1B). وبقدر ما يكون ثابت التخامد أعلى يكون الاقتراب من الصفر أبطأ.

إذا كان $\omega_0^2 = \gamma^2$ يكون الحل من الشكل:

$$\theta(t) = (\theta_0 + bt)e^{-\gamma t} \qquad (7)$$

يكون تخامد الجملة كبيراً جداً بحيث لا تتمكن من تجاوز وضعية التوازن. إن أي تخفيض للتخامد يؤدي في هذه الحالة للاهتزاز. تدعى هذه الحالة بالحالة الحدية اللادورية وهي تتمتع بأهمية عملية لأن الزمن اللازم للوصول إلى وضعية الصفر يكون عندها أصغرياً. تصمم بالاعتماد على هذه الظاهرة، أي ظاهرة التخامد اللادوري، المقاييس التي تتضمن مؤشراً لملف متحرك كما هو الحال في مقاييس التيار والتوتر المتناوب (الخط السفلي من الشكل 1C).

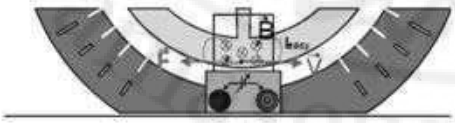
تستخدم في هذه التجربة عجلة معدنية قابلة للدوران عزم عطالتها J كجسم مهتز. يؤثر في العجلة نابض حلزوني لدى إزاحته بزاوية معينة θ عن وضع توازنه السكوني تؤدي إلى توليد عزم إرجاع يمكن التعبير عنه بالعلاقة التقريبية:

$$M = -D\theta \qquad (8)$$

تتناقص سعة الاهتزازات الميكانيكية مع الزمن (بسبب قوى الاحتكاك الناجمة عن احتكاك العجلة بالسطح الذي ترتكز عليه والتي لا يمكن تجنبها). فيتولد نتيجة لذلك اهتزازة حرة متخامدة. تتناسب قوى الاحتكاك (العزوم) في كثير من الحالات طردياً مع السرعة (الزاويَّة) في تقريب من المرتبة الأولى:

$$M_F = -r\frac{d\theta}{dt} \qquad (9)$$

فعندما تتعرض عجلة نواس الفتل الحلزوني المعدنية لحقل مغنطيس كهربائي تتخامد اهتزازاتها وفقاً للمعادلة (9). حيث تخضع الإلكترونات في العجلة لقوة لورنتس، ومِنْ ثَمَّ فهي تنزاح عمودياً على كل من حقل المغنطيس الكهربائي واتجاه حركة العجلة، لتتدفق في جزء العجلة الخالي من الحقل (الشكل2).



الشكل2. توليد تيارات فوكو

يتولد نتيجة لذلك دارة مغلقة لتيارات فوكو المتحرضة I_{eddy} في العجلة. حيث يؤدي جزء

العجلة المعدنية الذي يقع في الحقل المغنطيسي دور ناقل متحرك حامل للتيار تؤثر فيه قوة F بعكس اتجاه حركته وتتناسب طردياً مع سرعته. الأمر الذي يولد عزم كبح M_F.

3. الأدوات والأجهزة

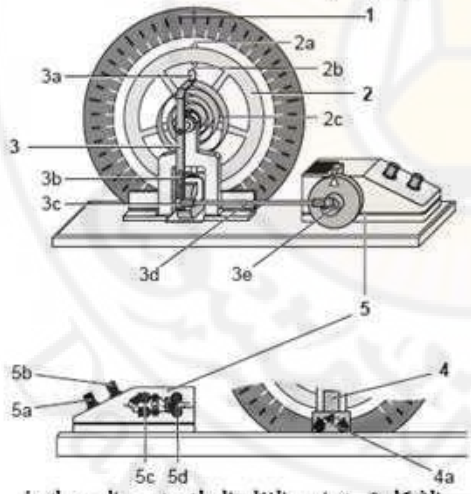
نواس الفتل الحلزوني، محرك ذو عجلة دوّارة مربوطة بساعد لقلب الحركة الدائرية إلى مستقيمة. يوضح الشكل3 أقسام ووظائف هذا النواس. كتلة إضافية $10g$ (عدد2)، كتلة $20g$، منبع التغذية 346012 (راجع الملحق في نهاية هذه التجربة للتعرف على مواصفاته)، ميقاتية، مقياس أمبير

ملاحظة تتعلق باستخدام التجهيزات:

إن الأدوات المخصصة لهذه التجربة "دراسة الاهتزازات الحرة والمتخامدة لنواس الفتل الحلزوني" تصلح أيضاً لدراسة اهتزازاته القسرية في التجربة التالية. كما أن الأدوات المخصصة لدراسة الاهتزازات القسرية للنواس الحلزوني تصلح أيضاً لدراسة الاهتزازات الحرة. والفارق بينهما أن علبة التغذية المستخدمة في الاهتزازات القسرية لا تتضمن إلّا مأخذاً واحداً للتيار المستمر، في حين تتطلب التجربة مأخذين للتيار المستمر أحدهما لتوليد تيارات فوكو والآخر لتغذية المحرك. ولهذا يستعان بجسر تقويم في هذه الحالة لتحويل التيار المتناوب إلى مستمر.

يتألف نواس الفتل الحلزوني (الشكل3) من:

1. حلقة مدرَّجَة.
2. جسم النواس الذي يتكون من حلقة تضم كلاً من مؤشر الانحراف (2a) ومؤشر العلاقة الطورية (2b) والنابض الحلزوني (2c).
3. منبع الاهتزاز ويضم كلاً من مؤشر العلاقة الطورية للمنبع (3a) والشق (3b). وبرغي (3c) وذراع الدفع (3d) وعجلة سواقة للاهتزاز (3e).



الشكل3. نواس الفتل الحلزوني والمحرك ذو العجلة

4. مغنطيس كهربائي لتحريض تيارات فوكو التي تكبح حركة العجلة المعدنية ومقبسين (4a) لوصل المغنطيس الكهربائي بمنبع

التغذية.

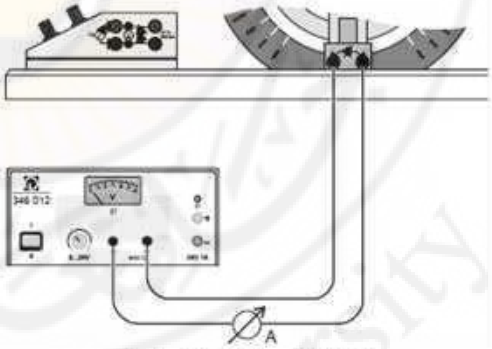
5. **محرك منبع الاهتزاز**. ويضم مجزِّئَيْ كمون دوّارَيْن أحدهما للتحكم الدقيق بكمون منبع الاهتزاز (5a) والآخر للتحكم الأقل دقة بكمون المنبع (5b) كما يضم مقبسين لقياس كمون منبع الاهتزاز (5c) ومقبسين لتطبيق كمون منبع التغذية (5d).

المعطيات التقنية للنواس الحلزوني – المعطيات العامة

يقدَّر التواتر الطبيعي للنواس الحلزوني بنحو $0.5Hz$، كما تقدَّر كتلته بنحو 6kg وأبعاده بنحو $40\text{cm}\times 14\text{cm}\times 27\text{cm}$.

المغنطيس الكهربائي لتوليد تيارات الكبح في العجلة المعدنية

ملاحظات الأمان (الشكل4)

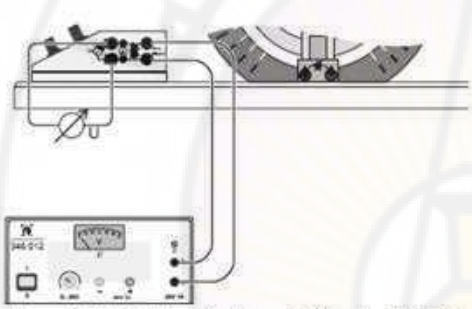


الشكل4. دارة تيارات فوكو

يجب على التيار المولد لتيارات فوكو أن لا يتجاوز $I=2A$، $0-24\text{VDC}$ كمون التغذية، التيار الأعظمي الذي يمكن تحمله $1A$، وفي حالة تيار عابر $2A$.

محرك منبع الاهتزاز (الشكل5)

يمكن تغيير تواتر منبع الاهتزاز ضمن المجال $0-1.2Hz$، يمكن تغيير كمون منبع الاهتزاز ضمن المجال $0-24\text{VDC}$، كمون التغذية 24VDC، وأما التيار المستهلك أخفض من $0.7A$.



الشكل5. طريقة توصيل منبع الاهتزاز في حال تطبيق الاهتزازات القسرية على النواس الحلزوني

لتحديد سعة الاهتزازات القسرية بدلالة تواتر منبع الاهتزاز يجب التحكم بالكمون المطبق على المحرِّك (انظر الشكل5)، كما يستخدم مقياس للكمون $24V>$. يمكن تغيير سعة منبع الاهتزاز بتغيير نقطة تطبيق ساعد الدفع 3d في الشق 3b (انظر الشكل3). يكون تواتر منبع الإثارة أصغر ما يمكن عند نقطة التطبيق المنخفضة.

4. طريقة العمل

قم بإعداد التجربة على النحو المبين في الشكل6. يتم قياس الزمن بساعة إيقاف (علماً بأنها لا تظهر على الشكل). قم بتهيئة مؤشر العجلة المعدنية 3a على وضعية صفر التدريج بتدوير العجلة السواقة 3e (في الشكل3).

a) دراسة الاهتزازات الحرة لنواس الفتل الحلزوني من دون تطبيق تيار تخامد

احرف النواس عن وضع توازنه من دون تطبيق أي تيار على المغنطيس الكهربائي، ثم اتركه يهتز، وقم بتسجيل عشر سعات متتالية على الجانب نفسه من النواس وذلك في السطر الثاني من الجدول1، ثم قس الزمن اللازم لعشر اهتزازات متتالية $t_1 = 10T$.

ملاحظة: إذا كان النواس يبلغ التوازن بأقل من عشر اهتزازات، قم بقياس زمن الاهتزازات الممكنة عدة مرات للحصول على القيمة الوسطية.

b) دراسة الاهتزازات الضعيفة التخامد

- كرر الإجراءات السابقة نفسها ولكن بتطبيق تيار ضعيف $I = 0.18\,\text{amp}$ في دارة المغنطيس الكهربائي.

- كرر التجربة نفسها بتطبيق تيار أعلى ($I = 0.4\,\text{amp}$ مثلاً).

c) حالة التخامد الشديد

- قم بزيادة تيار المغنطيس الكهربائي إلى أن يقوم النواس باهتزازة يمكن تمثيلها بالمنحني السفلي في الشكل(B)1.

d) حالة التخامد الحرج (الحالة الحدية)

- قم بتغيير تيار المغنطيس الكهربائي إلى أن يقوم النواس باهتزازة يصفها الخط السفلي في الشكل(C)1.

قس الزمن الذي يستغرقه النواس لدى تحريره من الحالة الحدية. عين القيمة الوسطية لخمسة قياسات مثلاً.

5. تحليل النتائج والمناقشة

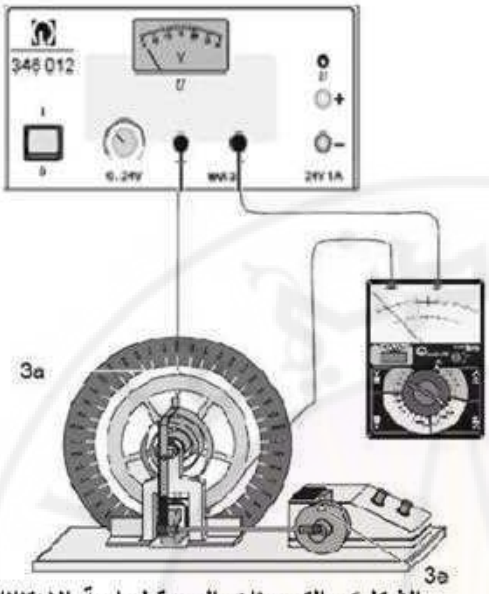
1. احسب دور اهتزاز النواس الموافق لحالات التخامد المختلفة من العلاقة $T = t_1/10$. ثم استكمل الجدول1 من أجل حالات التخامد المختلفة.

2. ارسم المنحنيات البيانية لتغير θ_n بدلالة الزمن مقدراً بمضاعفات الدور nT (لماذا لا نرسم تغير θ_n بدلالة الزمن) والموافقة لحالات تخامد النواس المختلفة على ورقة ملمترية (مرة بتعيين θ_n كما هي على المحور الشاقولي ومرة أخرى بأخذ اللغارتم الطبيعي لـ θ_n وتعيينه على المحور الشاقولي) ثم عين منها

ثابت تخامد السعة δ (ماذا يمثل هذا الثابت؟ وهل تتغير قيمته بدلالة الزمن؟)، ثم عين ثابت التخامد في واحدة الزمن γ (ماذا يمثل هذا الثابت وهل تتغير قيمته من لحظة إلى أخرى؟). أعد رسم المنحنيات السابقة باستخدام ورقة نصف لغارتمية، فتحصل على خطوط مستقيمة.

3. عين ثابت التخامد γ (ماذا يمثل هذا الثابت؟) الموافق لمختلف الحالات الاهتزازية من الرسوم البيانية وبالاستعانة بالمعادلة (5) ثم احسب التخامد اللغارتمي Λ الموافق لكل حالة.

4. هل يمكنك حساب التخامد اللغارتمي أولاً ثم ثابت التخامد؟ بين كيف يتم ذلك؟



الشكل6. التجهيزات المعدة لدراسة الاهتزازات الدورانية لنواس الفتل الحلزوني بتطبيق تيارات تخميد على عجلته (انظر الشكل4 أيضاً لترى كيفية توصيل المغنطيس الكهربائي

الجدول1

	θ_n	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}
1											
	nT	T	$2T$	$3T$	$4T$	$5T$	$6T$	$7T$	$8T$	$9T$	$10T$
2											
3											

ملحق 1

علبة تغذية نواس الفتل الحلزوني

1. وصف علبة التغذية

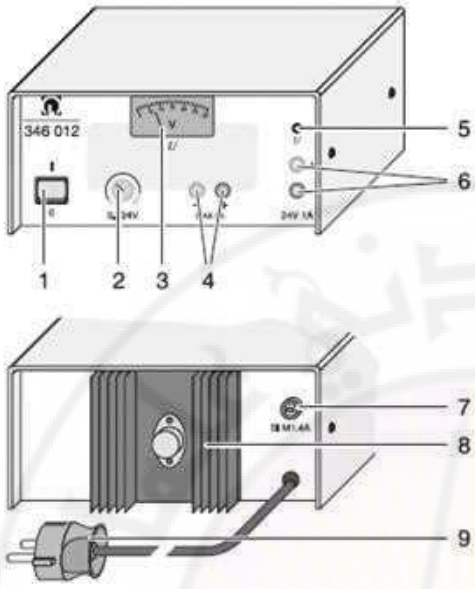
تعطي هذه العلبة كموناً مستمراً DC قابلاً للتغيير بشكل مستمر من 0 إلى 24VDC ويستخدم في تغذية المغنطيس الكهربائي، كما تعطي كموناً ثابتاً معزولاً كهربائياً 24VDC ويستخدم في تغذية محرك النواس الحلزوني. وهي تضم (انظر الشكل إلى اليسار):

1. قاطعة لوصل وفصل التيار الكهربائي مع مصباح إشعار.
2. زراً دوّاراً للتحكم بكمون الخرج من 0 إلى 24VDC.
3. مقياساً تمثيلياً للخرج من 0 إلى 24VDC.
4. المخرج من 0 إلى 24VDC.
5. مصباح إشعار بالخرج.
6. مخرجاً للكمون الثابت 24VDC.
7. حامل منصهرة .
8. مغطس حراري، 9. سلك قابس التيار الرئيسي.

ملحوظة: افصل علبة التغذية عن التيار لدى تغيير المنصهرة.

2. المعطيات الفنية

الجانب الرئيسي: يمكن تحويل كمون **الدخل**



علبة التغذية

115V/230V المصنع، استهلاك الطاقة 120VA، الوقاية M1.4A.

الجانب الثانوي: المخارج معزولة كهربائياً يتم توصيلها عن طريق مقابس أمان 4mm، الاستقرارية عند الحمولة العظمى $\leq 30mV$، التموج المتبقي $\leq 2mV_{RMS}$.

الخرج من **0** إلى24VDC (كمون DC مستقر إلكترونياً ويمكن تغييره باستمرار، حماية بدارة إلكترونية قصيرة، قدرة الحمولة العظمى 2A)

الخرج 24V (كمون DC مستقر إلكترونياً، حماية من الدارة الإلكترونية القصيرة، قدرة الحمولة العظمى 1A)، أبعاد العلبة $23cm \times 11.5cm \times 19cm$، الوزن $3.7kg$.

3. تشغيل علبة التغذية

a) وصل النواس الحلزوني، b) دارة الحماية الإلكترونية في حال ازدياد الحمولة.

يُدلُّ على تفعيل الوقاية الإلكترونية الداخلية في حال الحمولة الزائدة، في حالة الخرج من 0 إلى 24، عندما يهبط المؤشر التمثيلي (3) إلى الصفر، في حالة الخرج 24V، عندما ينطفئ المصباح المشعر (5).

يتم استرداد كمون الخرج آلياً إلى القيمة المعدة لحظة زواله بسبب الحمولة الزائدة.

4. تغيير المنصهرة



لتغيير المنصهرة الرئيسية في خلف العلبة، 1. انزع قابس شريط الطاقة (9)، 2. قم بتدوير حامل المنصهرة (7) بعكس اتجاه عقارب الساعة باستخدام مفك براغي 1. وانزعها من الحامل، 3. ضع منصهرة جديدة عوضاً عن المعطوبة (من النوع M1.4A)، 4. أدخل حامل المنصهرة وقم بتدويره باتجاه عقارب الساعة.

نموذج قياس تجريبي

a) دراسة تخامد اهتزاز نواس الفتل الحلزوني

يظهر في الجدول2 قيم سعة الاهتزاز θ_0 المقيسة بدلالة الزمن nT (مضاعفات دور الاهتزاز) من أجل $I = 0.18\,\text{amp}$ و $I = 0.25\,\text{amp}$. كما يبين الجدول3 دور الاهتزاز (القيمة المتوسطة التي تتعين من خلال خمس اهتزازات).

b) دراسة الانتقال من الاهتزاز إلى الحالات الحدية: في الحالة $I = 1.3\,\text{amp}$، وجد أن دور الاهتزاز المقيس $2.14s$. وفي الحالة $I = 1.5\,\text{amp}$، وجد أن دور الاهتزاز المقيس $1.9s$.

تقييم النتائج التجريبية

يلخص الشكل7 نتائج الجدول الثاني. يمكن تعيين ثابت التخامد γ مثلاً بالموافقة بين المعادلة (3) والمعطيات التجريبية. كما يمكن تعيين ثابت التخامد من الشكل8.

حيث يمكن منه تحديد التخامد اللغارتمي Λ في حالتي تيار كبح مختلفين. يضم الجدول الثالث كلاً من دور الاهتزاز وثابت التخامد والتخامد اللغارتمي في حالة تياري كبح مختلفين. وقد وجد أن تيار الكبح الموافق للانتقال من حالة الاهتزاز إلى الحالة الحدية $1.3\,\text{amp}$ ودور الاهتزاز $2.14s$ وأن النواس يصل إلى التوازن في حالة التيار $1.5\,\text{amp}$ خلال $1.9s$ من دون أن يتجاوز وضعية التوازن.

الجدول2

t(s)	θ_0 (Scd)*	t(s)	θ_0 (Scd)
0.0	20.2	0.0	20.2
1.8	18.7	1.8	17.2
3.5	17.3	3.6	14.5
5.3	16.3	5.3	12.3
7.1	15.2	7.2	10.4
8.9	14.2	9.0	8.7
10.7	13.2	10.8	7.5
12.5	12.3	12.6	6.3
14.3	11.4	14.5	5.3
16.2	10.6	16.3	4.5
17.9	9.9	18.2	3.8
19.8	9.1	20.0	3.2
21.6	8.5	21.9	2.7
23.5	7.9	23.8	2.2
25.3	7.3	25.6	2.0
27.1	6.9	27.5	1.7
28.9	6.3	29.3	1.4
30.8	5.9	31.2	1.3
32.7	5.5		
34.1	4.1		
35.9	3.7		
37.7	3.4		
39.5	3.0		
41.3	2.8		
43.1	2.5		
44.9	2.2		
46.7	2.0		
48.5	1.7		
50.3	1.6		
52.1	1.3		
53.9	1.1		
55.7	1.0		
57.5	0.9		
59.2	0.7		
61.0	0.5		

الجدول3

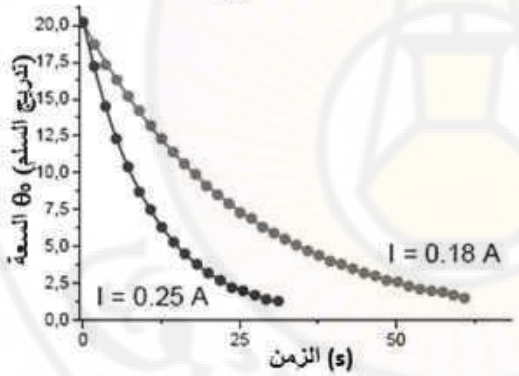
I تيارفوكو (amp)	Tدور الاهتزاز (Sec)
0.18	1.80
0.25	1.82

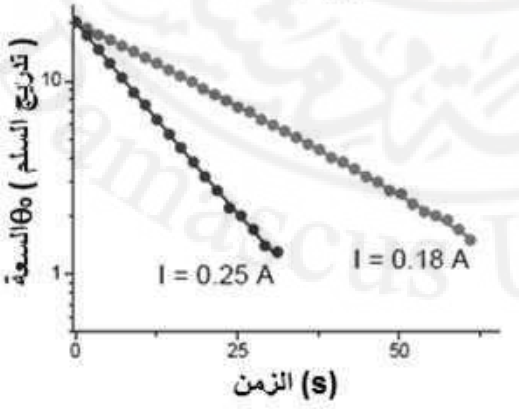
* يدل الرمز Scd على تدريجة السلم (Scale degree) .

الجدول4

I تيارفوكو (amp)	دور الاهتزاز T s	$\gamma\ s^{-1}$	Λ
0.18	1.80	0.039	0.07
0.25	1.82	0.041	0.17

الشكل7





الشكل8

التجربة (16)

نواس الفتل الحلزوني

الاهتزازات القسرية والتجاوب

1. هدف التجربة

- قياس سعة الاهتزازات الدورانية القسرية بدلالة تواتر منبع الاهتزاز في حالة قيم مختلفة لثوابت التخامد.
- تعيين التواتر الطبيعي لنواس الفتل الحلزوني.
- دراسة انزياح الطور بين منبع الاهتزاز القسري ونواس الفتل الحلزوني.

2. المبدأ النظري

تعدّ الاهتزازات الدورانية حالة خاصة من نماذج الهزازات الميكانيكية: كالنواس المركب ونواس الفتل الحلزوني إذ يمكن الحصول على معادلة شبيهة بمعادلة الحركة التوافقية البسيطة على نابض حلزوني آخذين الانزياح الزاوي متحولاً مستقلاً مباشرة، مكان الانزياح المكاني. فهي تسمح بدراسة معظم الظواهر المهمّة التي تحدث في كل أنواع الاهتزازات. تجري في التجربة رقم 15 دراسة الاهتزازات الدورانية الحرة والمتخامدة لنواس الفتل الحلزوني. أما في هذه التجربة فتجري دراسة سلوك نواس الفتل الحلزوني لدى تطبيق قوة خارجية دورية عليه.

تصبح المعادلة1 في التجربة السابقة لدى تطبيق عزم القوة الدوري (القسري):

$$M_f = M_0 \sin \omega_f t \qquad (1)$$

على الشكل:

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} + r\frac{d\theta}{dt} + D\theta = M_0 \sin \omega_f t \qquad (2)$$

حيث J عزم العطالة، D ثابت (عزم) إرجاع نواس الفتل الحلزوني، r معامل التخامد (معامل الاحتكاك)، θ زاوية الدوران (المتحول المستقل)، M_0 القيمة العظمى للعزم الخارجي و $\omega_f = 2\pi \cdot f$ التواتر الزاوي للعزم الخارجي القسري. أو يمكن كتابتها على الشكل:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\gamma\frac{d\theta}{dt} + \omega_0^2\theta = M_0 \sin \omega_f t / J \qquad (2)'$$

يتألف حل هذه المعادلة التفاضلية غير المتجانسة من مجموع حلين: حل خاص بالإضافة إلى الحل العام للمعادلة التفاضلية المتجانسة ($M_0 = 0$). غير أن هذا الأخير يتناقص أسياً (قارنه بالعلاقة (3) في التجربة السابقة) بحيث يتلاشى أثره بعد فترة زمنية معينة.

يمكن التعبير عن الحل الخاص للمعادلة (2)' بالعلاقة التالية:

$$\theta(t) = \theta_0(\omega_f)\sin(\omega_f t - \alpha) \quad (3)$$

وبتعويض المعادلة (3) في المعادلة (2)' تعطي التحويلات المثلثية لسعة الاهتزازة القسرية (راجع هذه الفقرة في نظري الاهتزازات والأمواج):

$$\theta_0(\omega_f) = \frac{M_0 / J}{\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega_f^2\right)^2 + \left(2\gamma\omega_f\right)^2}} \quad (4)$$

يدعى التواتر الذي تكون سعة الاهتزاز من أجله عظمى تواتر التجاوب ω_{res} (تجاوب السعة). وهي الحالة التي يكون فيها للجذر في المقام قيمة صغرى. وبجعل مشتق الجذر بالنسبة لـ ω مساوياً الصفر نحصل على العلاقة التالية لتواتر تجاوب السعة:

$$\begin{aligned} \omega_{res} &= \sqrt{\omega_0^2 - 2\gamma^2} \\ &= \sqrt{\omega_0^2 - (r^2 / 2J^2)} \end{aligned} \quad (5)$$

(6) حيث $\omega_0 = \sqrt{D/J}$ التواتر الطبيعي لنواس الفتل الحلزوني

(7) و $\gamma = r/2J$ ثابت التخامد

بقدر ما يكون تخامد نواس الفتل الحلزوني أضعف يكون اختلاف تواتر التجاوب عن تواتره الطبيعي ω_0 أقل وتكون سعته الزاويَّة أكبر. عندما يزول التخامد $(r \to 0)$ تسعى السعة الزاويَّة عند تواتر التجاوب $(\omega_f = \omega_0)$ نحو اللانهاية.

ينتج من المعادلة 4 أن سعة الاهتزاز القسري تسعى نحو الصفر في حالة التواترات الشديدة الارتفاع. وفي حالة التواترات الشديدة الانخفاض $(\omega_f \to 0)$ تسعى السعة الزاويَّة نحو القيمة $M_0 / J\omega_0^2$ (والتي لا تساوي الصفر). ولن يكون منحني التجاوب تناظرياً بالنسبة إلى ω_{res}. يتم تطبيق الحركة الدورية في هذه التجربة عن طريق ذراع المحرِّك، كما يتم عن طريق مغنطيس كهربائي توليد حقل مغنطيسي من شأنه أن يحرّض تيارات فوكو الكهربائية في عجلة النواس المعدنية تعاكس حركتها فتعيقها، ومِنْ ثَمَّ من شأنها أن تغير معامل تخامد النواس من خلال تغيير شدة الحقل المطبق.

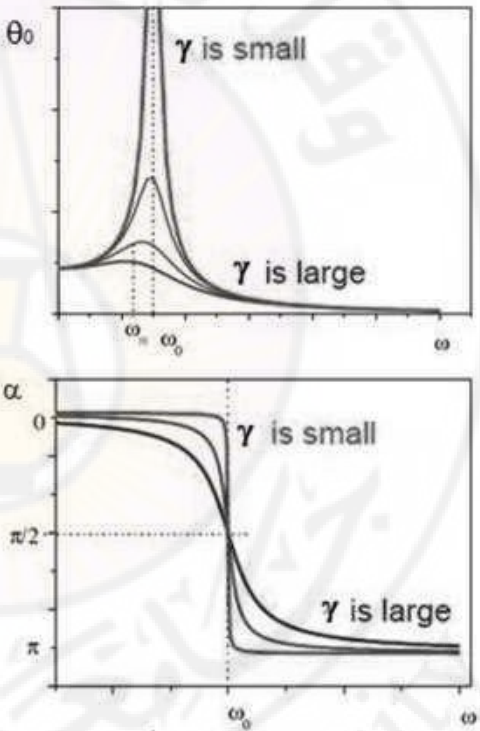
ملحوظة: يجب تمييز تجاوب الطاقة عن تجاوب السعة الذي أوردناه في الأعلى. يمكن البرهان على أن الطاقة الاهتزازية للنواس تكون عظمى لدى تساوي التواتر الزاوي للعزم الخارجي القسري والتواتر الزاوي الطبيعي للنواس: أي يحدث تجاوب الطاقة عندما يكون $\omega_f = \omega_0$.

يتم الحصول على كل من تجاوبي الطاقة والسعة بتواترين قسريين مختلفين. يعطى فارق الطور α بين التواتر الخارجي القسري

وتواتر النواس بالعلاقة:

$$\tan\alpha = \frac{2\gamma\,\omega_f}{\omega_0^2 - \omega_f^2} \qquad (8)$$

في الشكل1 منحنيات التجاوب وانزياح الطور بين تواتر منبع الاهتزاز وتواتر اهتزاز نواس الفتل الحلزوني في حالة قيم مختلفة للتخامد γ.



الشكل1. منحنيات التجاوب (في الأعلى) وانزياح الطور (في الأسفل) بين تواتر منبع الاهتزاز وتواتر اهتزاز نواس الفتل الحلزوني في حالة قيم مختلفة للتخامد γ.

ينتج من العلاقة (8) أنه:

في الحالة $\omega_f << \omega_0$ يهتز كل من النواس ومنبع الاهتزاز على التوافق في الطور $(\alpha \approx 0)$.

وفي الحالة $\omega_f >> \omega_0$ يهتز كل من النواس ومنبع الاهتزاز على التعاكس في الطور $(\alpha \approx \pi)$.

في الحالة $\omega_f = \omega_0$ يتخلف النواس عن منبع الاهتزاز بمقدار $\pi/2$ بالضبط.

3. الأدوات والأجهزة

نواس الفتل الحلزوني يتمفصل معه مؤشر الزاوية والذراع، علبة تغذية عامة لتغذية المحرك 13500.93، ساعة إيقاف رقمية، جسر مقوّم 30VAC/1ADC، مقياس متعدد، سلكا توصيل بطول 25cm وخمسة أسلاك بطول 75cm.

ملحوظة تتعلق باستخدام التجهيزات: إن الأدوات المخصصة لهذه التجربة "دراسة الاهتزازات القسرية لنواس الفتل الحلزوني والتجاوب" تصلح أيضاً لدراسة اهتزازاته الحرة والمتخامدة. كما أن الأدوات المخصصة لدراسة الاهتزازات الحرة تصلح أيضاً لدراسة الاهتزازات القسرية. والفارق بينهما أن علبة التغذية المستخدمة في الاهتزازات القسرية لا تتضمن إلّا مأخذاً واحداً للتيار المستمر، في حين تتطلب التجربة مأخذين للتيار المستمر أحدهما لتوليد تيارات فوكو والآخر لتغذية المحرك. ولهذا يستعان بجسر تقويم في هذه الحالة لتحويل التيار المتناوب إلى مستمر.

4. طريقة العمل

راجع قبل البدء بإجراء هذه التجربة أجزاء نواس الفتل الحلزوني ومعطياته التقنية في التجربة السابقة.

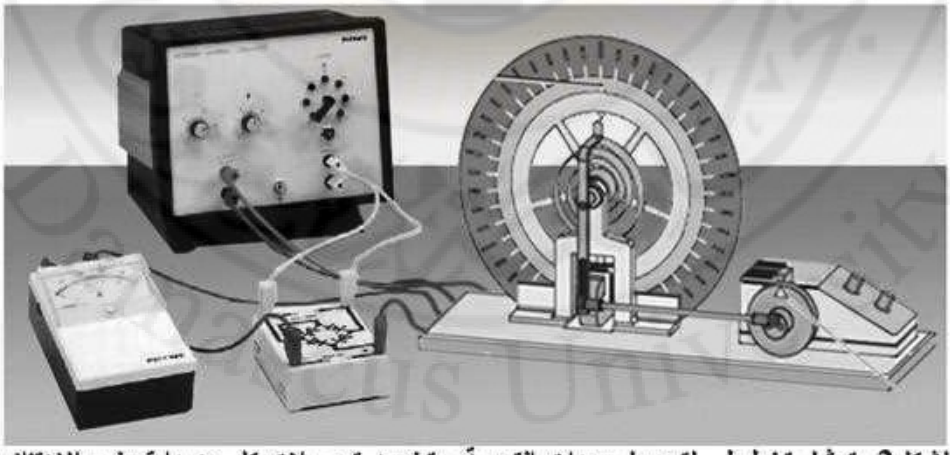
يبين الشكل2 مخطط التجربة. يقاس دور منبع الاهتزاز T بساعة إيقاف. كما يبين الشكل3 إمكانية التحكم بسعة الاهتزاز.

ملاحظات الأمان

- يجب أن لا يتجاوز التيار في مكبح تيارات فوكو $2\,\mathrm{amp}$ لفترة طويلة.
- تجنب زيادة تسخين الملفات بإجراء قياسات لتيارات تزيد على $1\,\mathrm{amp}$ لفترة طويلة.

a) دراسة السعة بدلالة التواتر – تسجيل منحني التجاوب

- اجعل المغنطيس الكهربائي (مكبح تيارات فوكو) متوسط القيمة ($I = 0.4\,\mathrm{amp}$ مثلاً).
- هيئ تواتر منبع الاهتزاز بتعديل الكمون المطبق على المحرك (راجع التجربة السابقة من أجل التعرف على كيفية التحكم بتواتر الاهتزاز، ضمن المعطيات التقنية لنواس الفتل الحلزوني). ابدأ بقيمة صغيرة للتواتر كالقيمة $f \approx 0.1Hz$ مثلاً.
- كرر مراحل العمل التي قمت بها في التجربة السابقة لحساب كل من ثابت تخامد السعة δ وثابت التخامد في واحدة الزمن γ.



الشكل2. تمثيل تخطيطي لتوصيل معدات التجربة، يتضمن توصيلات كل من دارة منبع الاهتزاز، والدارة التي تحرّض توليد تيارات فوكو.

ملحوظة: إن قياس الكمون المطبق على منبع الاهتزاز لا يؤدي في هذه التجربة إلّا دور تحكم. ولقياس السعة بدلالة تواتر المنبع f ينصح بقياس دور منبع الاهتزاز T، ثم إيجاد التواتر $f = 1/T$ في حينه لدى إجراء التجربة.

- قس دور منبع الاهتزاز T بقياس الزمن الذي تستغرقه عشر دورات لعجلة النواس $10T$، واحسب تواتره $f = 1/T$.
- خذ قراءة السعة في الحالة التي يبلغ فيها الاهتزاز القسري حالة مستقرة تكون فيها السعة الزاوية للاهتزازات المتتالية ثابتة.
- سجل قياساتك في جدول.

ملحوظة: يجب، لدى قياس السعة بدلالة تواتر منبع الاهتزاز أي الحصول على منحني التجاوب، انتظار عدة دقائق قبل أن تثبت السعة الزاوية إلى حد كاف ويستقر الاهتزاز القسري. ينطبق هذا الأمر بشكل خاص على حالة التخامد الضعيف. يتم رصد عملية الاستقرار بشكل خاص كخفقة أقرب للتجاوب (لهذا السبب يجب اختيار قيمة متوسطة لتيار البدء).

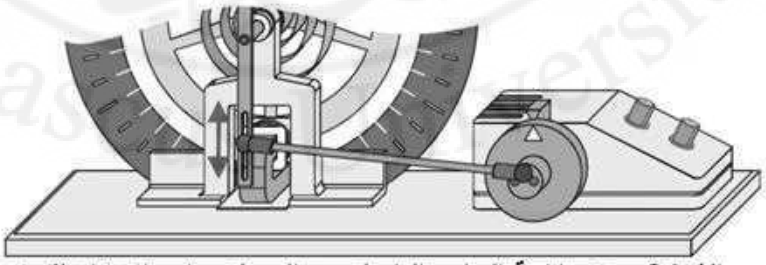
- لدى تغيير تواتر المنبع إلى قيمة جديدة يمكن أن يصبح ضرورياً إعادة كمون منبع الاهتزاز بعد القياس وتعيين التواتر، للحصول على قيمة ملائمة للتواتر بالنسبة للتهيئة السابقة للتواتر.

يجب تغيير التواتر، في منطقة التغير السريع للسعة، وفق خطوات صغيرة.

ينصح بإيقاف منبع الاهتزاز كلياً بين الإعدادات المختلفة لمنبع الاهتزاز وبدء الاهتزازات القسرية من الصفر. ومِنْ ثَمَّ يقصر الزمن الذي تستغرقه عملية الإعداد.

- قارن حركات مؤشري منبع الاهتزاز والنواس. راقب علاقة الطور بين منبع الاهتزاز والنواس بشكل كيفي وسجل ذلك في دفترك.

كرّر التجربة في حالة تخامدات صغيرة ($I = 0\,\text{amp}$ مثلاً) وكبيرة ($I = 0.7\,\text{amp}$ مثلاً) واملأ الجدولين الموافقين.



الشكل3. يمكن إزاحة الساعد الواصل بين المحرك ومنبع الاهتزاز للتحكم في سعة الاهتزاز.

b) تعيين التواتر الطبيعي لنواس الفتل الحلزوني

- اجعل تيار كبح تيارات فوكو $I = 0\,\text{amp}$، وقم بحرف النواس للحصول على اهتزازات دورانية حرة.
- عين التواتر الطبيعي f_0 بقياس الزمن الذي تستغرقه عشر اهتزازات $10T_0$ في حال عدم تفعيل المكبح.
- احسب التواتر الطبيعي من خلال $f_0 = 1/T_0$.

ملحوظة: لا يمكن تقدير التواتر الطبيعي f_0 كقيمة حديَّة للاهتزازات غير المتخامدة تماماً، لقوى الاحتكاك التي لا يمكن تجنبها.

ملحوظة: يمكن للمعطيات التجريبية أن تختلف من نواس إلى آخر نظراً للتفاوتات التي لا يمكن تجنبها بين مختلف مكابح تيارات فوكو وللتفاوتات في إعداداتها الميكانيكية.

الجدول1. يضم الدور والتواتر وسعة الاهتزاز θ_0 في الحالة $I = 0.4\,\text{amp}$

	$10T\ (s)$	$T\ (s)$	$f = 1/T\ (Hz)$	θ_0
1				
2				
3				
.				
.				
13				

الجدول2. الدور والتواتر وسعة الاهتزاز θ_0 في الحالة $I = 0\,\text{amp}$

	$10T\ (s)$	$T\ (s)$	$f = 1/T\ (Hz)$	θ_0
1				
2				
3				
.				
.				
13				

الجدول3. الدور والتواتر وسعة الاهتزاز θ_0 في الحالة $I = 0.79\,\text{amp}$

	$10T\ (s)$	$T\ (s)$	$f = 1/T\ (Hz)$	θ_0
1				
2				
3				
.				
.				
13				

5. تحليل النتائج والمناقشة

a) رسم سعة الاهتزاز بدلالة التواتر (تسجيل منحني التجاوب)

– ارسم على ورقة ملمترية النتائج التي سجلتها في الجداول 1 و2 و3 لتغيرات سعة الاهتزاز معبراً عنها بالوحدة المسجلة على الحلقة المدرجة بدلالة تواتر المنبع.

b) قارن ما سجلته بخصوص الطور في الحالات الثلاث:

– **التواترات الصغيرة.** هل يتفق منبع الاهتزاز والنواس وضمن أيّ حدود؟ علل ذلك.

– **التواترات الكبيرة،** هل يساوي الطور π وضمن أيّ حدود يقترب منها؟ علل ذلك.

– هل يساوي فارق الطور نحو $\pi/2$ في حالة السعات الكبيرة؟

c) قدّر انزياح تواتر التجاوب في الحالتين $I = 0.4\,\text{amp}$ و $I = 0.79\,\text{amp}$، واحسب الانزياح وفق العلاقة 5، ثم بين فيما إذا كانا يتفقان ضمن حدود الأخطاء التجريبية.

d) بعد أن قمت بإجراء تجربة نواس الفتل الحلزوني بشقيها (دراسة الاهتزازات الحرة والقسرية) هل يمكن في رأيك القيام بهذين الشقين من دون الاستعانة بجسر تقويم؟ وكيف؟

معلومات إضافية

إن كل الاهتزازات التوافقية القسرية تقود إلى المعادلة التفاضلية (2). يمكن نقل حل هذا النموذج العام للنواس إلى أنواع أخرى من الاهتزاز كالاهتزازات الكهربائية القسرية مثلاً.

يمكن دراسة تأثير سعة منبع الاهتزاز على سعة الاهتزازة القسرية بعمليات ضبط مختلفة لقضيب التوصيل.

ملحق 1

علبة تغذية نواس الفتل الحلزوني

1. وصف علبة التغذية

تعطي هذه العلبة كموناً مستمراً DC قابلاً للتغيير بشكل مستمر من 0 إلى 18VDC ويستخدم في تغذية المحرك، كما تضم مأخذاً للتيار المتناوب يمكن أن يستخدم بعد تقويمه في تغذية دارة المغنطيس الكهربائي.

وهي تضم (الشكل 4):



الشكل4. علبة التغذية

1. مفتاحاً للتحكم في خرج الكمون المستمر 2.

2- خرجاً للكمون المستمر من 0 إلى 18 فولط مستمر.

3- مفتاحاً للتحكم في تيار خرج الكمون المستمر 2.

4- ثنائياً ضوئياً يضيء في حال تطبيق تيار أو في حال استخدام الكمون المستمر كمنبع للتيار.

5- مقبساً ⊥ يوصل بالأرضي في حال توصيل علبة التغذية بمأخذ المدينة.

6- حلقة من المقابس لانتقاء تفريعات الكمون المتناوب عند 7.

7- خرجاً للكمون المتناوب من 2 إلى 15 فولطاً.

8- قاطعة وقاية للخرج 7 في حال تجاوز التيار قيمة معينة، تتضمن مبدلاً حرارياً.

9- قاطعة للمأخذ الرئيسي.

نموذج قياس تجريبي

a) تعيين سعة الاهتزاز بدلالة التواتر – تسجيل منحني التجاوب

يبين الجدول 4 الزمن الذي يستغرقه عشر اهتزازات والتواتر الموافق وسعة الاهتزازة θ_0 مقدرة بالتدريج على الحلقة المدرجة في الحالة $I = 0.4\,\text{amp}$.

الجدول 4

10 T (sec)	f (Hz)	θ_0 (Scale degree)
70.0	0.143	0.8
45.0	0.222	0.9
31.8	0.315	1.1
23.7	0.423	1.5
20.6	0.484	2.2
19.1	0.523	3.0
18.0	0.554	2.9
16.8	0.596	2.0
15.4	0.649	1.3
13.3	0.754	0.9
11.4	0.880	0.7
10.0	0.998	0.6

يبين الجدول 5 الزمن الذي يستغرقه عشر اهتزازات والتواتر الموافق وسعة الاهتزازة θ_0 مقدرة بالتدريج على الحلقة المدرجة في الحالة $I = 0\,\text{amp}$

الجدول 5

10 T (sec)	f (Hz)	θ_0 (Scale degree)
39.9	0.250	1.0
30.1	0.332	1.1
30.0	0.333	1.1
25.1	0.399	1.4
20.9	0.479	2.5
19.5	0.514	4.8
18.7	0.535	9.6
18.2	0.551	15.4
17.9	0.560	18.7
17.8	0.563	19.4
17.4	0.574	7.2
17.4	0.576	3.8
17.2	0.581	3.4
15.9	0.629	1.7
13.1	0.762	0.9
11.3	0.889	0.7
10.0	0.997	0.6

يبين الجدول6 الزمن الذي يستغرقه عشر اهتزازات والتواتر الموافق وسعة الاهتزازة θ_0 مقدرة بالتدريج على الحلقة المدرجة في الحالة $I = 0.79\,\text{amp}$.

الجدول6

10 T (sec)	f (Hz)	θ_0 (Scale degree)
95.1	0.105	0.8
51.2	0.195	0.9
36.1	0.277	1.0
25.3	0.396	1.1
21.6	0.464	1.3
20.0	0.499	1.3
18.1	0.551	1.2
16.2	0.617	1.1
14.7	0.682	0.9
12.4	0.805	0.7
10.8	0.927	0.6
9.3	1.079	0.5

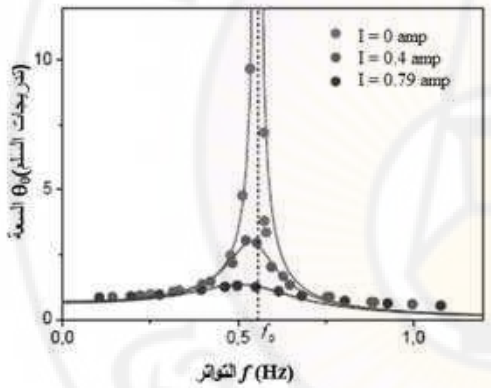
الطور. – يتحرك كل من مؤشر منبع الاهتزاز والهزاز متفقين في الطور في حالة التواترات الصغيرة.

- يتحرك المؤشران متعاكسين في الطور في حالة التواترات الكبيرة.
- يكون فارق الطور نحو $\pi/2$ في حالة السعات الكبيرة.

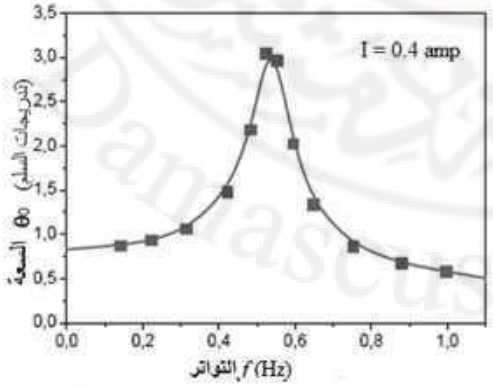
b) تعيين التواتر الطبيعي للهزاز

بالاعتماد على قياس عشر اهتزازات وجد أن الدور يساوي $T_0 = 1.8s$ ومِنْ ثَمَّ فإن التواتر يساوي $f_0 = 0.556\,Hz$.

في الشكل 5. منحنيات التجاوب في حالة تيارات كبح مختلفة. الخطوط المستمرة تنسجم مع المعادلة (5). وقد تم في الجدول التالي إدراج البرامترات التي تنسجم فيما بينها. f_0 تقابل التواتر في الحالة $I = 0\,amp$.



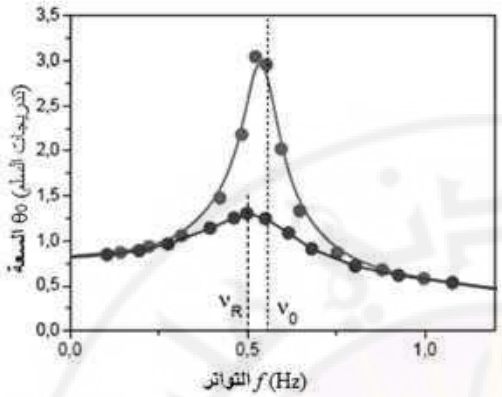
الشكل5. منحنيات التجاوب



الشكل6. منحني التجاوب في الحالة $I = 0.4\,\text{amp}$

يظهر في الشكل6 التجاوب في الحالة $I = 0.4\,\text{amp}$، والخط المستمر ليس إلا دليلاً للعين.

يظهر في الشكل7 انزياح تواتر التجاوب بين الحالتين $I = 0.4\,\text{amp}$ و $I = 0.79\,\text{amp}$. الخطان المستمران ليسا إلّا دليلين للعين فحسب.



الشكل7. منحني التجاوب في الحالة

الجدول4 . البرامترات التي تنسجم فيما بينها

I amp	M_0 N scale deg	J kg (scale deg)^2	f (Hz)	r kg (scale degree)^{2}s^{-1}
0.0	0.62	3.0	0.555	$0.0084.10^{-3}$
0.4	0.62	3.0	0.545	$0.38\ .\ 10^{-3}$
0.79	0.62	3.0	0.532	$0.89\ 10^{-3}$

التجربة (17)

ميزان الفتل الثقالي لكافانديش

تعيين ثابت التجاذب الكوني

1. هدف التجربة

- التعرف على ميزان الفتل الثقالي وعلى أوضاع توازنه.
- قياس ثابت التجاذب الكوني G بطريقتين: a) الطريقة التوازنية: تحديد زاوية الانحراف الطرفي.

b) الطريقة التحريكية: تعيين تغيّر زاوية الانحراف بدلالة الزمن.

2. المبدأ النظري

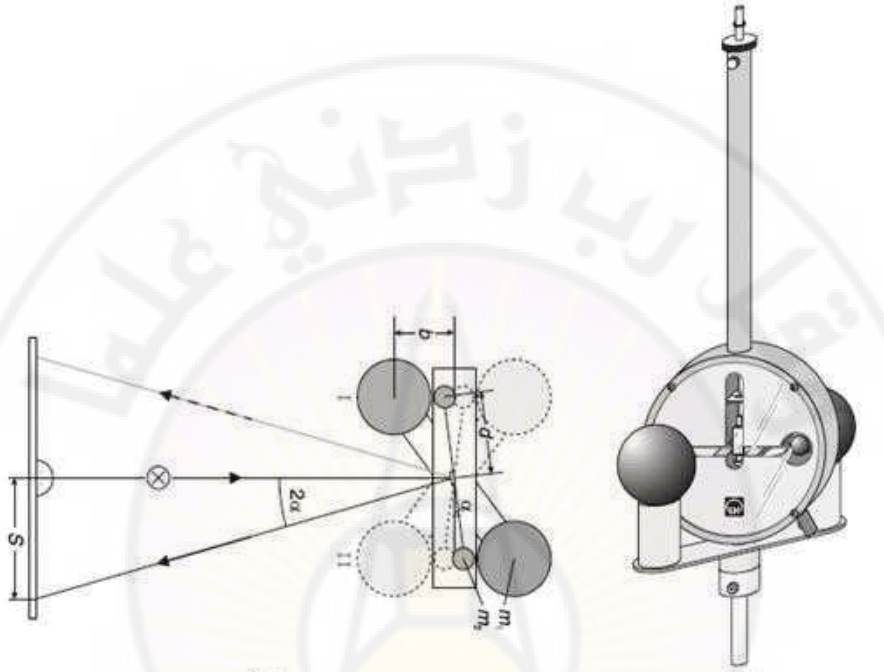
يتكون ميزان الفتل الثقالي Gravitation torsion balance (الشكل1a)، المعروف بميزان كافنديش من عاتق عرضاني خفيف معلق بشكل أفقي بشريط فتل رفيع[1]. يحمل العاتق في كل من طرفيه كرة رصاصية صغيرة كتلتها m_2 على بعد d من نقطة التعليق (الشكل1b). تؤثر في هاتين الكرتين كرتان رصاصيتان كبيرتان، كتلة كل منهما m_1، بقوة تدعى قوة التجاذب الثقالي. يحيط بالكرتين الصغيرتين وعاء مغلق لحمايتهما من التيارات الهوائية، فيه نافذتان شفافتان لينفذ الضوء من خلالهما. كما تثبّت على العاتق العرضاني مرآة ترد عليها حزمة من الضوء الأحمر (إما ضوء الليزر وإمّا ضوء ثنائيين مصدرين للضوء في كاشف الموضع ويصدران ضوءاً أحمر عالي الشدة) ثم تنعكس عنها بحيث يمكن تحديد أي فتل للسلك عن طريق قياس انحراف البقعة الضوئية على مسطرة بعيدة أو على شاشة حاسب باستخدام كاشف موضع Infrared Position Detector إلكتروني بالأشعة تحت الحمراء. على الرغم من ضعف قوة التجاذب بين الكرتين (التي تقل عن $10^{-9}N$)، فإنه يمكن إظهارها باستخدام هذا الميزان. حيث يمكن رصد حركة كل من كرتي الرصاص الصغيرتين.

تستخدم لهذا الغرض، كما ذكرنا أعلاه مرآة مقعرة، الأمر الذي يجعل البقعة المنعكسة عنها حادة المعالم ويمكن تحديدها بدقة.

---

[1] لكون الشريط الحامل للعاتق من مادة البرونز (راجع الملحق في نهاية التجربة) التي تتصف بالمرونة وقابلية الانقطاع، فإن النواس يتضمن إمكانية تثبيت العاتق لدى الانتهاء من التجربة ولدى الحاجة لنقله من مكان لآخر.

يمكن تحديد انحراف البقعة الضوئية بطريقتين: a) إمّا التوازنية وإمّا b) التحريكية. يمكن الاستعانة في كل من الطريقتين إمّا بضوء الليزر وإمّا بكاشف الموضع الموصول بحاسب.



(b) (a)

الشكل1. ميزان الفتل الثقالي لكافانديش والمخطط الإجمالي للبقعة الضوئية

1a) قياس الانحراف الطرفي End-deflection بضوء الليزر

إن قياس انحراف البقعة الضوئية يعني قياس زاوية فتل سلك النواس لدى تغيير العزم المطبق عليه. من الجدير بالذكر أنه يمكن التعبير عن القوة الثقالية بين كرتين من الرصاص كتلتاهما m_1 و m_2 تبعد إحداهما عن الأخرى بالمسافة b بالعلاقة:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{b^2} \qquad (1)$$

إن تفاعل كل من الكرتين المحمولتين على العاتق، وفق الترتيب التجريبي، مع الكرة الكبيرة المقابلة لكل منهما يشكل مزدوجة (الشكل1b). من شأن تغير البعد بين الكرتين في قوتي المزدوجة التجاذبيتين أن يسبب فتلاً للسلك يتناسب مع تغير عزم المزدوجة الذي يعطى بالشكل:

$$M_1 = 2F \cdot d = 2G \cdot \frac{m_1 m_2}{b^2} \cdot d \quad (2)$$

عندما تكون كرتا الرصاص الكبيرتان في الوضع I (انظر الشكل1)، يتوازن هذا العزم مع العزم القائم لسلك الفتل، ومِنْ ثَمَّ يتخذ نواس الفتل وضع التوازن المحدد بالزاوية α_I.

بتدوير الكرتين الرصاصيتين الكبيرتين إلى الوضع II، تنعكس القوى بشكل تناظري. يساوي عزم المزدوجة الذي يؤثر في الجسمين عندئذٍ $M_{II} = -M_I$.

يهتز النواس في هذه الحالة حول وضع التوازن α_{II} باهتزازات متخامدة، إلى أن يستقر عندها.

يمكن كتابة الفارق بين عزمي المزدوجتين في الحالتين بدلالة الزاوية التي دارها السلك بالشكل:

$$D(\alpha_I - \alpha_{II}) = M_I - M_{II} = 2M_I \quad (3)$$

حيث D ثابتة فتل السلك التي يمكن تعيينها (راجع التجربة السابعة من هذا الكتاب التي تتضمن ميزان الفتل ونواس الفتل) من دور الاهتزاز T وعزم عطالة نواس الفتل J.

$$D = J \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \quad (4)$$

إن عزم عطالة نواس الفتل J يكافئ مجموع عزمي عطالة الكرتين الصغيرتين بالنسبة إلى محور الدوران.

$$J = 2m_2 \cdot d^2 \quad (5)$$

ومِنْ ثَمَّ تصبح العلاقة 4 على الشكل:

$$D = m_2 \cdot d^2 \cdot \frac{8\pi^2}{T^2} \quad (6)$$

وبالاستفادة من العلاقات من (1) إلى (6) نحصل على ثابت التجاذب الكوني:

$$G = \frac{b^2 \cdot d}{m_1} \cdot \frac{2\pi^2}{T^2}(\alpha_I - \alpha_{II}) \quad (7)$$

تقاس زاوية الدوران $\alpha = \alpha_I - \alpha_{II}$ بشكل غير مباشر (الشكل1) بقياس كل من انحراف البقعة الضوئية على المسطرة وبُعْد هذه الأخيرة عن العاتق L_0. ينطبق وضع البقعة الضوئية في الوضع النظامي على نقطة صفر التدريج. وفي حال انزياح البقعة بالمقدار S تعطى α بالعلاقة: $\tan 2\alpha = \frac{S}{L_0}$

أو للصغر الشديد للزاوية α بالعلاقة:

$$\alpha \approx S / 2L_0 \quad (8)$$

تؤخذ زاوية الورود β على المرآة المقعرة في الحسبان (الشكل2)، إذا لم تقع البقعة الضوئية عند الصفر. فإذا وقعت هذه الأخيرة في حالة الوضع الابتدائي لنواس الفتل على بعد L_1 من النقطة المرجعية N (التي تقع على الخط الناظمي على المرآة المقعرة) يكون بعد النقطة عن النواس: $L = \sqrt{L_0^2 + L_1^2}$

في حال دوران نواس الفتل بالزاوية α عن موقع الصفر، تسري على انحراف البقعة الضوئية العلاقة:

$$S' = L \cdot \tan 2\alpha$$

و

$$\frac{S'}{S} = \frac{\sin[90^\circ - (2\alpha + \beta)]}{\sin(90^\circ - 2\alpha)} = \cos\beta - \tan 2\alpha \cdot \sin\beta$$

تكون الزاوية α صغيرة جداً في جميع الحالات (لاتزيد أبداً على 1.5°)؛ كما أن أبعاد ميزان الفتل الثقالي لا تسمح بزوايا إضاءة تزيد على 30° ومِنْ ثَمَّ فإن التقريب:

$$\frac{S'}{S} = \cos\beta \approx \frac{L_0}{L}$$

مقبول وبوجود التقريب الإضافي $2\alpha = \tan 2\alpha$ نستطيع القول إجمالاً:

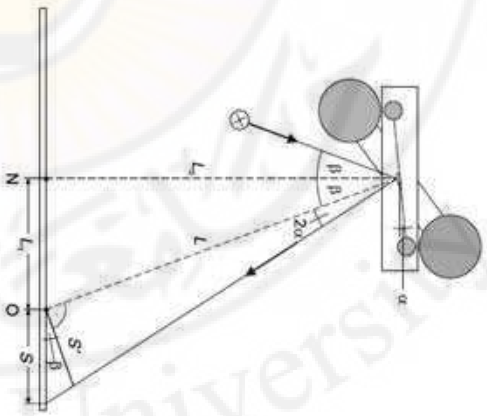
$$\alpha = \frac{S}{2} \cdot \frac{L_0}{L_0^2 + L_1^2} \qquad (9)$$

تتضمن المعادلة الأخيرة خطأ نظامياً يقدر بنحو 1 إلى 2%. غير أنه لدى حساب فارق وضعي التوازن $(\alpha_I - \alpha_{II})$ يتم التخلص من هذا الخطأ النظامي تماماً تقريباً.

يجب في الحالة الخاصة للإضاءة عند الزاوية $\beta = 0^\circ$ افتراض أن $L_1 = 0$؛ تعطي المعادلة (9) في هذه الحالة العلاقة (8) التي سبق استنتاجها.

تسري المعادلة (9) أيضاً على الحالة التي يتم فيها توجيه زاوية حزمة الإضاءة نحو الأعلى أو الأسفل. يجعل سلم القراءة في هذه الحالة أيضاً أفقياً، وتهمل تغيرات ارتفاع البقعة الضوئية.

إن وضع نواس الفتل الطبيعي (النقطة O في الشكل2) لا يعرف عموماً قبل إجراء التجربة. لتحديد L_1، تقاس المسافة بين النقطة المرجعية N على الخط الناظمي وموقع البقعة الضوئية في وضع التوازن I في حالة التقديرات الدقيقة.



الشكل2. شكل تخطيطي لقياس الانحراف الطرفي بالبقعة الضوئية

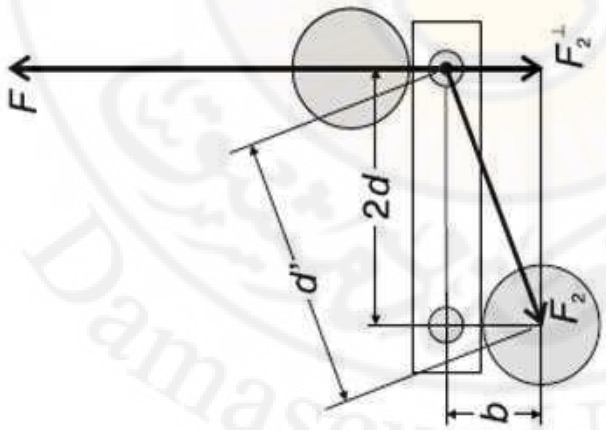
وإن هذا التقريب مسموح لأن $\alpha << 1$. في الحالة الخاصة التي تكون فيها زاوية إضاءة المرآة المقعرة حادة جداً أي $\beta << 1$ ، يمكن أن نفترض بأن $L_1 = 0$.

يمكن في الحالة العامة تعيين ثابت التجاذب الكوني من المعادلتين (7) و (9):

$$G = \pi^2 \cdot \frac{b^2 \cdot d}{m_1} \cdot \frac{S_I - S_{II}}{T^2} \cdot \frac{L_0}{L_0^2 + L_1^2} \qquad (10)$$

تمثل الكميات $m_1 = 1.5kg$ و $d = 50mm$ و $b = 47mm$ ثوابت الجهاز. وأما الكميات التي يجب قياسها فهي دور اهتزاز T نواس الفتل، والبعد بين موقعي البقعة الضوئية S_I و S_{II} عند وضعي التوازن α_I و α_{II} والهندسة التي تشكلها البقعة الضوئية مع المرآة المقعرة.

يفترض استنتاج المعادلة (2) أن تكون قوتا التجاذب عموديتين على العائق، ومِنْ ثَمَّ تقع O على الناظم على المرآة. أما إذا لم يكن الأمر كذلك فنحتاج إلى صياغة أكثر دقة من المعادلة (2). نظراً لقرب الكرة الثقيلة الثانية من الكرة الصغيرة المثبتة بالعائق والتي تجري دراستها، فإنها ستؤثر في التحريك الدوراني لتلك الكرة الصغيرة بالمركبة العمودية على العائق $F_2^{\perp}$ إضافة إلى القوة F التي وردت في المعادلة (2) (الشكل3).



الشكل3

تعطى قيمة F_2 بالعلاقة $F_2 = G\frac{m_1 m_2}{d'^2}$ ومركبتها بالعلاقة $F_2^{\perp} = G\frac{m_1 m_2}{d'^2} \cdot \frac{b}{d'}$ حيث $\frac{b}{d'}$ جيب الزاوية التي تصنعها قوة التجاذب بين كل من الكرتين الصغيرتين والكتلة الثقيلة الثانية بالنسبة إلى منحى قوة تجاذبها مع الكرة الثقيلة الأولى. يصبح عزم المزدوجة في هذه الحالة:

$$M_I = 2(F - F_2^{\perp}) \cdot d$$

أما d' فيعطى بالعلاقة (الشكل3):

$$d' = \sqrt{(2d)^2 + b^2}$$

ويكون معامل تصحيح K المعادلة (2) هو:

$$K = \frac{F}{F + F_2^1} = \frac{1}{1 - \frac{b^3}{d'^3}} = 1.083$$

ملاحظة: يمثل الوضع الناظمي للكرتين الثقيلتين عزم مزدوجة معدوم.

2a) الطريقة التحريكية (بضوء الليزر)

يتم في هذه الطريقة تحديد زاوية الانحراف مع الزمن بالاستعانة بضوء الليزر. بعد تدوير الكرتين الرصاصيتين الكبيرتين من الوضع I إلى الوضع II مباشرة، يطبق سلك الفتل (بعد فتله) عزماً عمودياً $-M_I$ على العاتق العرضاني، بحيث يساوي العزم الكلي المطبق على العاتق $2M_{II}$. الأمر الذي يُكسِب الجملة التسارع الزاوي:

$$\ddot{\alpha} = 2M_{II} / J$$

يمكن، كتقريب أولي، افتراض بأن هذا التسارع الزاوي يظل ثابتاً في أثناء الدقيقة الأولى وأن السرعة الزاوية الابتدائية معدومة، ومِنْ ثَمَّ نستطيع القول، بعد المكاملة مرتين، أنه عند نهاية هذا الزمن نجد:

$$\alpha = \alpha_I + \frac{2M_{II}}{J} \cdot t^2 \qquad (12)$$

أي $\alpha - \alpha_I = \frac{2M_{II}}{J} \cdot t^2$ ومنه:

$$\frac{2M_{II}}{J} = \frac{\alpha - \alpha_I}{t^2}$$

من 2 و 5 و 12 نحصل على:

$$G = \frac{b^2 \cdot d}{m_1} \cdot \frac{\alpha - \alpha_I}{t^2}$$

وباستخدام المعادلة (9) نحصل على المعادلة:

$$G = \frac{b^2 \cdot d}{m_1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{S - S_I}{t^2} \cdot \frac{L_0}{L_0^2 + L_1^2} \qquad (13)$$

ومِنْ ثَمَّ يمكن حساب G بطريقة التسارع، حيث يقاس تغير موقع البقعة الضوئية على التدريج بدلالة كل من الزمن t والهندسة التي تشكلها البقعة مع المرآة المقعرة. قد تكون هذه الطريقة أسهل تناولاً باستخدام الحاسوب وكاشف الموضع.

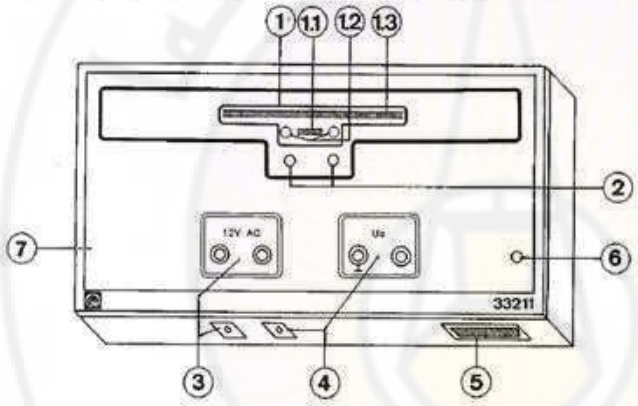
b) تحديد مقدار الانحراف باستخدام كاشف الموضع

إن كاشف الموضع تحت الأحمر IRPD infra-red position detector هو أداة قياس تستخدم جنباً إلى جنب مع ميزان الفتل الثقالي. فهو يسجل اهتزازات ميزان الفتل التي تحدث عندما ينتقل من وضع سكون معين إلى آخر، ويحولها إلى كمونات تتناسب طردياً مع سعة الاهتزاز. يتم تسجيل هذه الكمونات

بمسجل YT أو يتم تقديرها أو إظهارها أو طبعها باستخدام حاسب.

مبدأ القياس

يضم كاشف الموضع تحت الأحمر أربعة ثنائيات (1.1)، تصدر الضوء تحت الأحمر الذي يتم إسقاطه على مجموعة خطية من الترانزستورات الضوئية (1.3) المتوضعة إلى جانب الثنائيات المصدرة للضوء مباشرة عن طريق مرآة مقعرة (نصف قطرها $0.7m$) في ميزان الفتل الثقالي. ثمة أداة تحكم مكروية تشعل الثنائيات الضوئية IR على التتالي وتحدد الترانزستور الضوئي المضاء. كما يقوم برنامج في هذه الحالة بتحديد موقع البقعة الضوئية. ولما كان البعد بين الثنائيات تحت الحمراء IR أصغر منه بين الترانزستورات الضوئية، فإنه يتم الحصول على مقدرة فاصلة تقدّر بنحو 0.64mm حتى لو كان البعد بين الترانزستورات الضوئية يساوي 2.54mm. يقدر طول القسم المقيس بنحو 80mm، وهو يساوي نحو ثلاثة أضعاف البعد بين الخيالين اللذين يتم الحصول عليهما لوضعيتي سكون ميزان الفتل الثقالي. يضم كاشف الموضع تحت الأحمر ثنائيين مصدرين للضوء الأحمر بشدة عالية يستخدمان في إعداد نواس الفتل الثقالي بالإضافة إلى ثنائي أحمر وآخر أخضر لضبط ارتفاع كاشف الموضع بالنسبة إلى النواس.



الشكل4. كاشف الموضع ومكوناته

1- ملاحظات الأمان

- لا تستخدم إلّا منبعاً للكمون يساوي 12VAC
- يمكن لإلكترونيات الجهاز الحساسة أن تتلف وأن تتأذى بالانفراغ الكهراكدي electrostatic discharge (ESD)

ولإجراء القياسات باستخدام كاشف الموضع :- اختر للتجربة مكاناً بحيث لا يمكن للشحنات أن تتراكم على المجرب أو الأدوات أو - تأكد بأن الشحنات تتفرغ بأمان، عن طريق قضيب معدني مؤرض مثلاً (القضيب الموصول (No.53216))

2. وصف كاشف الموضع ومعطياته التقنية

المعطيات التقنية

①نافذة تظهر من خلالها الثنائيات الضوئية المصدرة للإشعاع تحت الأحمر(1.1)، والثنائيان الضوئيان (1.2) المستخدمان في ضبط نواس الفتل و32 ترانزستوراً ضوئياً (1.3) التي تستخدم كمستقبل للأشعة تحت الحمراء.

② ثنائيان ضوئيان أحمر وأخضر، يتم التحكم فيهما من خلال أداة تحكم مكروية.

③الوصل إلى منبع كمون 12VAC، إمّا عن طريق مقابس 4-mm بمحوّل 12V (مثل56273) أو عن طريق قوابس مجوفة لقبس منبع التغذية 12VAC (562791)

④ مخرج تمثيلي لوصل مسجل YT- مثلاً، إما عن طريق مقابس 4-mm أو قابس جاك 3.5 mm

⑤ وصلة تسلسلية RS232/sub-D25 لوصل كاشف الموضع بحاسب عن طريق FUNCABLE (530008)

⑥ زر إعادة تهيئة

⑦ وصلة بعشرين دبوساً لأغراض فحص كاشف الموضع من قبل الشركة المصنعة.

ملقط لتركيب المادة الحاملة لكاشف الموضع خلفه.

منبع تغذية 12VAC، استهلاك الطاقة نحو3W.

كمون الخرج من 0-2.3V (بانحراف قدره$\pm 1.5\%$)،

تيار الخرج الأعظمي 5mA مع حماية ضد قصر الدارة، تضم أربعة ثنائيات مصدرة للإشعاع تحت الأحمر، كما تضم 32 ترانزستوراً ضوئياً، لاستقبال الإشعاع تحت الأحمر، المقدرة الفاصلة الانسحابية $\pm 2\% \cdot \frac{0.64mm}{18.5mV}$.

1b) طريقة الانحراف الطرفي باستخدام كاشف الموضع

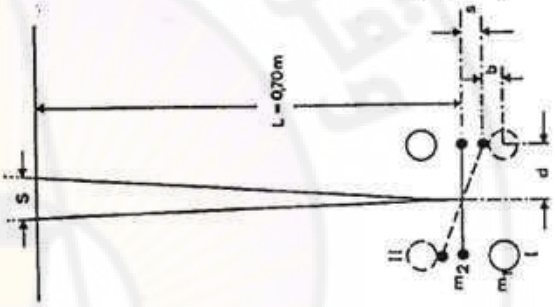
يجري في هذه الطريقة تقييم الوضعين النهائيين لكرتي الرصاص الصغيرتين المعلقتين عندما تكون كرتا الرصاص الكبيرتان في الوضع *I* ثم في الوضع *II*.

لحساب ثابت التجاذب الكوني G تستخدم العلاقة التالية (التي يمكن بالاستناد إلى ماسبق استنتاجها بسهولة):

$$G = \frac{\pi^2 \cdot b^2 \cdot d \cdot S}{m_1 \cdot T^2 \cdot L} \qquad (14)$$

حيث b البعد بين مركزي كل من كتلة نواس الفتل الصغيرة والكتلة الكبيرة اللتين تخضعان لقوة التجاذب ويساوي $b = 47mm$، d البعد بين مركز كل من كرتي الرصاص الصغيرتين

m_2 عن محور الفتل ويساوي $d = 50mm$، m_1 كتلة إحدى الكرتين الكبيرتين وتساوي $1.5kg$، T دور اهتزاز ميزان الفتل الثقالي، L البعد بين ميزان الفتل الثقالي وكاشف الموضع يساوي $0.70m$، S البعد بين الخيالين المرآتيين في الوضعين النهائيين I و II، والذي يقاس بكاشف الموضع (الشكل5).



الشكل5

2b) الطريقة التحريكية باستخدام كاشف الموضع

لا يستخدم في هذه الطريقة إلّا وضع واحد من الوضعين السكونيين I و II (الشكل5). حيث يتم تقدير تسارع كل من الكرتين الصغيرتين a_0 مباشرة بعد أن تغير الكرتان الكبيرتان اتجاههما. ويوصى بتقدير البعد S خلال الدقيقة الأولى.

في حالة المرحلة الأولى للحركة نكتب:

$$m_2 \cdot a_0 = 2G \cdot \frac{m_1 m_2}{b^2}$$

ومنه نحصل على:

$$G = \frac{a_0 b^2}{2m_1} \qquad (15)$$

حيث يمكن تعيين تسارع a_0 كل من الكتلتين m_2 من التسارع a'_0 عن طريق انعكاس الضوء على النحو:

$$a_0 = \frac{d}{2L} \cdot a'_0 \qquad (16)$$

ولما كان $S = \frac{1}{2} \cdot a'_0 t^2$، فإن مقارنة المعامل بالمعادلة العامة للقطع المكافئ تعطي:

$$x = At^2 + Bt + C \qquad (17)$$

$$a'_0 = 2A \qquad (18)$$

3. الأدوات والأجهزة

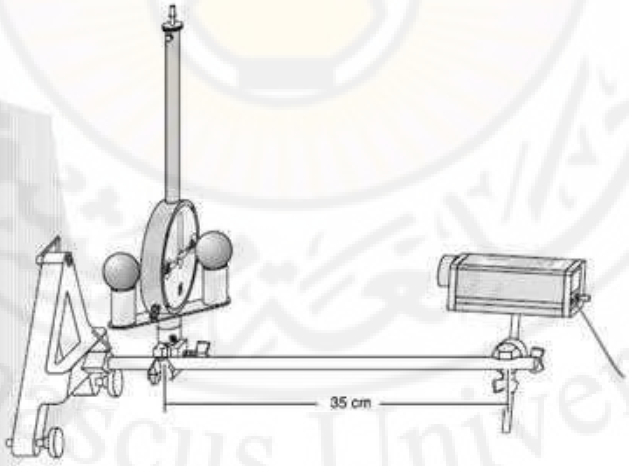
1- ميزان الفتل الثقالي 332101، 2- ليزر هليوم – نيون المستقطب خطياً 471480، 3-ساعة إيقاف 31305، 4- مقياس طول فولاذي طوله 2m، 5- قاعدة على شكل حرف V 30002، 6- ملقط دوار 30103، 7- ملقط متعدد 30101، 8- قضيب بطول 47cm، 9- كاشف موضع للأشعة تحت الحمراء، حاسب يعمل بويندوز 98 فما فوق وقد نصّب عليه برنامج كاسي ليعمل مع كاشف الموضع.

ملاحظات الأمان والحيطة

- يحقق الهليوم النيون المعيار التقني الألماني "متطلبات الأمان للأجهزة التعليمية والتدريبية – الليزر DIN58126, Part6" لليزرات الصنف 2. يصبح التعامل مع ليزر الهليوم – نيون مأموناً لدى التقيد بالاحتياطات الواردة في ورقة التعليمات. – لا تنظر إلى حزمة الليزر المباشرة أو المنعكسة.

- لا تتجاوز حدود التحديق (يجب أن لا يشعر المراقب بالانبهار).

ولاستخلاص نتائج واضحة يجب ألّا يخضع ميزان الفتل لأي اضطراب كي تظهر اهتزازات فتل النواس الناجمة عن التجاذب بين الكتل بوضوح. إن نواس الفتل حساس للغاية للصدمات المنقولة إلى حجرة ميزان الفتل. تؤدي تغيرات في درجات الحرارة إلى تيارات حمل في حجرة ميزان الفتل التي تحدث حركات غير مرغوبة لنواس الفتل. لذلك يفضل تثبيت الميزان على حائط صلب وألّا يتعرض لأشعة الشمس مباشرة أو لتيارات هوائية. تجنّب، عند تدوير حامل الكرة، تعريض الحجرة للصدمات، كطرقها بإحدى الكرتين الرصاصيتين. يبين الشكل6 ترتيب التجربة.



الشكل6. ترتيب معدات القياس بالليزر في حال تثبيت الجسر إلى الحائط

4. طريقة العمل

a) تعيين ثابت التجاذب الكوني باستخدام الليزر

حرر العاتق من حامله ثم حدد وضع التوازن الابتدائي، على ألّا يتعرض نواس الفتل خلال هذه المدة التي قد تستغرق ساعتين على الأقل، لأي اضطراب بالصدمات، بحيث يمكن له أن يصل إلى السكون في وضعه التوازني.

- تأكد من استقرار نقطة الصفر.
- راقب ترنحات البقعة الضوئية لعشر دقائق على الأقل.
- قس البعد L_0 من نواس الفتل إلى الحائط، والبعد L_1 من النقطة N إلى الوضع S_I (انظر الشكل2) ودوّن هذه المعطيات.

1) طريقة الانحراف الطرفي

- حرك الذراع الحامل للكرتين الرصاصيتين الكبيرتين بسرعة (ولكن بحرص) من الوضع I إلى الوضع II وابدأ ساعة الإيقاف.
- اقرأ موقع البقعة الضوئية على التدريج كل ثلاثين ثانية على الأقل لمدة ثلاثة أدوار اهتزاز ودوّن هذه القيم في الجدول1.

الجدول1. الوضع الطرفي S_{II} للبقعة الضوئية بعد تدوير كرتي الرصاص الكبيرتين إلى الوضع *II*.

رقم القياس	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S(mm)$										

حيث $S(mm)$ موقع البقعة الضوئية على المسطرة

الجدول2. الوضع الطرفي S_I للبقعة الضوئية بعد تدوير كرتي الرصاص الكبيرتين إلى الوضع I.

رقم القياس	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S(mm)$										

حيث $S(mm)$ موقع البقعة الضوئية على المسطرة

يمكن تكرار القياس بإعادة تدوير حامل الكرتين الرصاصيتين الثقيلتين من جديد إلى الوضع I، وتسجيل الوضع الطرفي S_I للبقعة الضوئية في الجدول 2.

2) طريقة التسارع

- انتظر حتى تستقر الجملة في وضع توازنها المستقر ثم أوجد S_I ودوّن هذه القيمة.
- حرك الذراع الحاملة للكرتين الرصاصيتين بسرعة (ولكن بعناية) من الوضع I إلى الوضع II، وابدأ ساعة الإيقاف.

الجدول3. موقع البقعة الضوئية S_{II} في الدقيقة الأولى بعد تدوير كرتي الرصاص الكبيرتين من جديد إلى الوضع II.

الزمن $t(s)$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$S(mm)$										

حيث $S(mm)$ موقع البقعة الضوئية على المسطرة

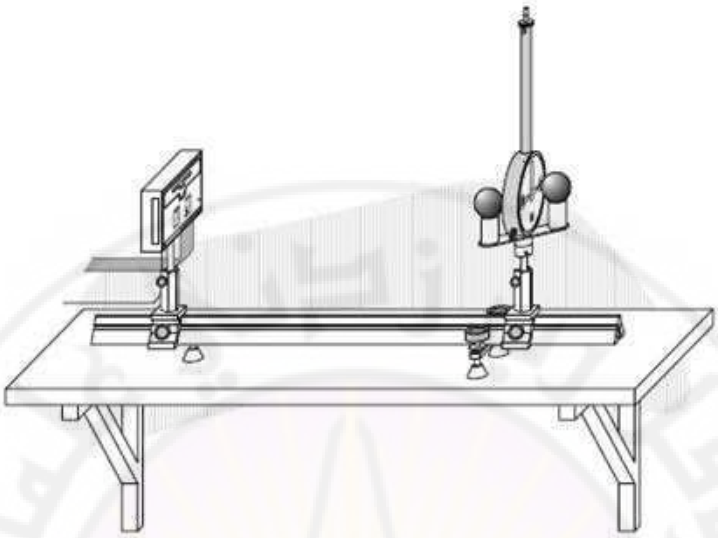
- اقرأ موقع البقعة الضوئية على التدريج كل عشر ثوان على الأقل خلال دور الاهتزاز، ودوّن هذه القيم في الجدول3.

b) تعيين ثابت التجاذب الكوني باستخدام كاشف الموضع

يركب كل من ميزان الفتل الثقالي وكاشف الموضع تحت الأحمر على جسر ضوئي طوله متر واحد (الشكل7)، بحيث يبعد أحدهما عن الآخر بمقدار 0.70m، باستخدام مَرْكَبتين ملحقتين بالجسر. يجب أن يكون الجسر الضوئي مستقراً، ويقع على سطح لا يكون عرضة للاهتزاز. كما يمكن تثبيت الجسر الذي يركب عليه كل من نواس الفتل الثقالي وكاشف الموضع بالحائط كحل بديل. يركب الملقط clamp الموجود على اللوحة الخلفية لكاشف الموضع IRPD على قضيب حامل قصير يتم إدخاله في مركَبة على الجسر الضوئي.

- تهيئة المسافة بين ميزان الفتل وكاشف الموضع

يجب أن تكون المسافة بين مرآة ميزان الفتل الثقالي والترانزستورات الضوئية في كاشف الموضع 70cm. ولتحقيق ذلك اجعل المسافة 67cm، بين النافذة الأمامية لميزان الفتل الثقالي واللوحة الأمامية لكاشف الموضع IRPD. حرر ميزان الفتل الثقالي وقم بتوجيهه.



الشكل7. ترتيب معدات القياس في حال استخدام كاشف الموضع

بحيث تستطيع جملة القياس من الحركة بحرية.

– إسقاط الثنائيات الضوئية على صف من الترانزستورات الضوئية

إن كاشف الموضع جاهز للعمل فور وصله بالكمون (12VAC) من المحولة (56273)(6V, 12V) مثلاً أو من منبع تغذية بقابس.

اضبط نافذة كاشف الموضع IRPD ①إلى مستوى مرآة ميزان الفتل الثقالي المقعرة. صل كاشف الموضع بالمنبع 12VAC. يضيء في هذه الحالة الثنائيان المصدران للضوء الأحمر بشدة، بحيث ترى خيالهما المرآتي في مستوي كاشف الموضع، إمّا عليه نفسه أو على صفيحة من الورق يتم حملها إلى جواره. إذا كان الخيال يقع إلى يسار النافذة أو يمينها، اجعل ميزان الفتل الثقالي يهتز ببطء بحيث يمر خيال الثنائيين المرآتي عبر اللوحة الأمامية. إذا كان الخيال إلى أعلى النافذة أو تحتها اجعله يسقط في المركز برفع كاشف الموضع أو تخفيضه. تأكد من أن صف الترانزستورات الضوئية في كاشف الموضع يقع في المستوي الذي تغطيه المرآة بحركتها بحيث تستخدم الترانزستورات الضوئية كلها في القياس. يستخدم الثنائيان الضوئيان الأخضر والأحمر ② في ضبط ارتفاع كاشف الموضع بدقة حيث يضيئان ويطفئان بحسب الشدة الضوئية الساقطة على الترانزستورات الضوئية.

حيث يومض الثنائي الأحمر Red LED flickers: عندما تكون إضاءة الترانزستورات الضوئية أو عملية ضبط الارتفاع كافية. كما يومض الثنائي الأخضر Green LED flickers: عندما تكون إضاءة الترانزستورات الضوئية أو عملية ضبط الارتفاع جيدة. بفرض أن صف الترانزستورات يقع في المستوي الذي تضيئه المرآة.

- ضبط ميزان الفتل الثقالي

يجب ضبط ميزان الفتل الثقالي بحيث تضيء المرآة عندما تكون مستقرة مركز نافذة كاشف الموضع تقريباً في غياب القوى التي تطبقها الكرات الرصاصية الكبيرة. لا يتم إجراء هذا الضبط إلّا مرة واحدة، لأن وضعية التوازن يتم الإبقاء عليها بعد تثبيت ميزان الفتل الثقالي. يقدّر دور اهتزاز ميزان الفتل الثقالي بنحو 10min.

- تسجيل اهتزازات نواس الفتل الثقالي

يتم تسجيل اهتزازات نواس الفتل إما بمسجل YT أو بحاسب عن طريق وصلة بينية لخرج تمثيلي ④.

مجالات القياس 3V، 1-5mm/min

أو وصل حاسب بالخرج⑤ RS232 .

ثمة طريقتان مختلفتان، كما أوردنا أعلاه، لإجراء القياس بميزان الفتل الثقالي باستخدام كاشف الموضع: الطريقة التوازنية أوالطريقة التحريكية (التسارع).

تسجل القيم المقيسة وتقيم باتباع الطريقة المعتادة لاستخدام كاشف الموضع "IR position detector" والمتوافرة في البرمجيات المرافقة للجهاز "Universal Data Acquisition".

1) طريقة الانحراف الطرفي (التوازنية)

يجري في هذه الطريقة تقويم الوضعين النهائيين لكرتي الرصاص الصغيرتين المعلقتين عندما تكون كرتا الرصاص الكبيرتان في الوضع *I* ثم في الوضع *II*.

لحساب ثابت التجاذب الكوني G تستخدم العلاقة (14).

2) طريقة التسارع

لا يستخدم في هذه الطريقة إلّا وضع واحد من الوضعين السكونيين *I* و *II* (الشكل5). حيث يتم تقدير تسارع كل من الكرتين الصغيرتين a_0 مباشرة بعد أن تغير الكرتان الكبيرتان

اتجاهيهما. ويوصى بتقدير البعد S خلال الدقيقة الأولى، وتطبيق كل من المعادلات (15) و (16) و (17) و (18) للحصول على ثابت التجاذب الكوني.

5. تحليل النتائج والمناقشة

1) ارسم تغيرات موقع البقعة الضوئية S، بدلالة الزمن من الجدول1. يجب أن يكون المنحني الناتج اهتزازياً متخامداً ضعيف التخامد. قدِّر عدة أدوار وقارن فيما بينها ثم احسب متوسطها في حال كونها متقاربة. أما موقع التوازن الأول S_{II} فيحدد من نهاية التخامد على المحور S. قارن هذه النتيجة بالقيمة S_I الأولى قبل البدء بالتجربة.
ارسم تغيرات S من الجدول 2 متبعاً الخطوات السابقة نفسها ثم حدد S_I.

2) ارسم تغيرات S من الجدول3 بدلالة t^2. وإذا كانت الأمور جيدة من دون اضطرابات ستحصل على مستقيم يمكن حساب ميله وكتابته في المعادلة 13.

نرى بذلك أن جميع القياسات التي تم إجراؤها بالليزر يمكن القيام بها باستخدام كاشف الموضع وحاسب مكان المسطرة وقراءات S المتتالية. حيث يوضع في هذه الحالة كاشف الموضع مكان المسطرة ويوصل بواسطة وصلة بينية إلى الحاسب أو الراسمة الورقية وتعدَّل البقعة الضوئية لتسقط على كاشف الموضع.
حيث يمكن بالاعتماد على شاشة الحاسب إطلاق بدء القياس وتحديد المدة الزمنية الفاصلة بين قياس وآخر، كما يمكن حفظ نتائج القياس في جداول مشابهة للجداول 1 و2 و3 في ملفات خاصة بكل جزء.

يمكن بعد إنجاز كل جزء من التجربة رسم المنحنيات المقابلة وأخذ المعلومات اللازمة لحساب G.

نموذج قياس تجريبي بالاعتماد على الليزر

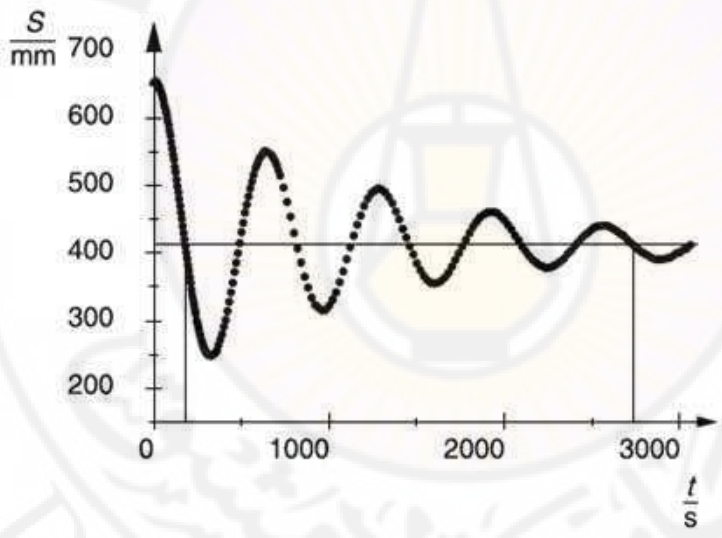
$L_0 = 6385\,mm$ و $L_1 = 1370\,mm$، حيث لا تنطبق نقطة صفر التدريج موقع البقعة الضوئية لصفر نواس الفتل (L_1: هو البعد بين موقع البقعة الضوئية S_I والنقطة المرجعية N على الخط الناظمي).

a) طريقة الانحراف الطرفي $S_I = 650mm$

يبين الجدول التالي الموضع الطرفي S للبقعة الضوئية بعد تدوير الكرتين الرصاصيتين الكبيرتين إلى S_{II}. في حين يبين الشكل النموذج التجريبي الموافق لاهتزازات ميزان الفتل الثقالي حول وضع التوازن النهائي S_{II}. يمكن من أدوار الاهتزاز الأربعة للميزان حساب $T = 639s$.

وباستخدام الانحرافات الطرفية الخمسة الأولى $S^{(1)} - S^{(2)}$ للبقعة الضوئية (انظر الجدول في الأعلى)، يمكن حساب موقع التوازن S_{II}:

$$S_{II} = \frac{1}{2}\left(\frac{S^{(1)} + S^{(3)} + S^{(5)}}{3} + \frac{S^{(2)} + S^{(4)}}{2}\right) = 415mm$$



No.	S(mm)
1	248
2	551
3	315
4	496
5	355
6	407
7	405

اهتزازات ميزان الفتل الثقالي حول وضع التوازن النهائي S_{II}.

نحصل من المعادلة 10 من دون تصحيح على النتيجة: $G = 6.29 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$، ومع التصحيح تصبح النتيجة: $G = 6.81 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$.

أما القيمة الواردة في المراجع فهي: $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$

b) طريقة التسارع:

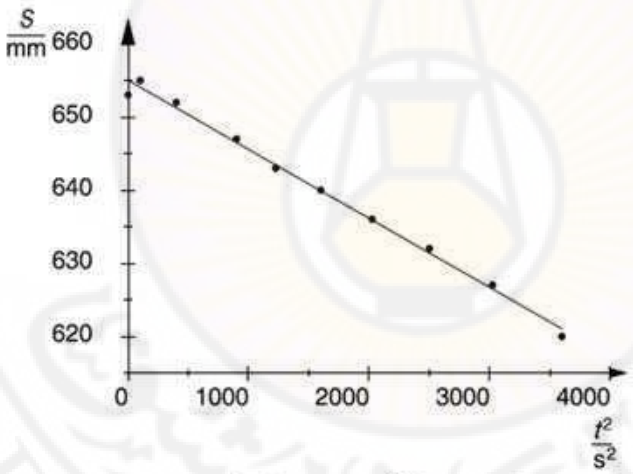
يبين الجدول التالي الموضع الطرفي S للبقعة الضوئية خلال الدقيقة الأولى بعد تدوير الكرتين الرصاصيتين الكبيرتين إلى S_{II}، في حين يبين الشكل العلاقة الخطية للموضع الطرفي للبقعة الضوئية بدلالة مربع الزمن في الدقيقة الأولى بعد التدوير.

يقدر ميل الخط على النحو:

$$\frac{S_I - S}{t^2} = 9.4 \cdot 10^{-3} \frac{mm}{s^2}$$

تعطينا المعادلة 13 من دون تصحيح النتيجة: $G = 5.2 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$،

ومع التصحيح تصبح النتيجة: $G = 5.6 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$



موقع البقعة الضوئية S بدلالة t^2 في الدقيقة الأولى بعد تدوير كرتي الرصاص الكبيرتين.

T(s)	S(mm)
0	653
10	655
20	652
30	647
35	643
40	640
45	636
50	632
55	627
60	620

ولتناقص تسارع كرتي الرصاص خلال الزمن بسبب الانخفاض في فتل الخيط، فإن أفضل خط مستقيم مناسب لإيجاد النسبة: $\frac{S - S_I}{t^2}$ فيه خطأ نظامي. تبين الدراسة الدقيقة أن هذا الخطأ يصل إلى 7.5% لدى تسجيل عُشْر دور الاهتزاز T أي نحو 60s. وإن تصحيح هذا الخطأ يعطي القيمة:

$$G = 6.0 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$$

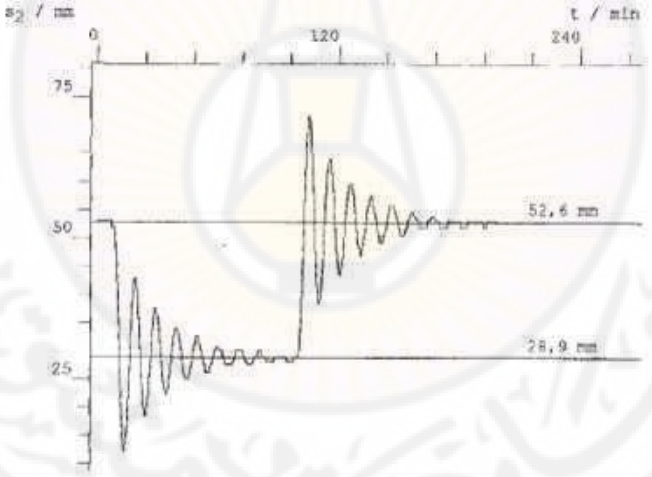
نموذج قياس تجريبي بالاعتماد على الحاسب وكاشف الموضع

a) طريقة الانحراف الطرفي

تظهر في الشكل التالي اهتزازات ميزان الفتل الثقالي المتخامدة عند الوضعين النهائيين الموافقين. يدل الحساب على أن $T = 615s$، وأن البعد بين الخيالين المرآتيين الموافقين للوضعين النهائيين $S = 23.7mm$. وبتعويض هذه القيم في المعادلة (14) نحصل على:

$$G = \frac{\pi^2 \cdot (0.047m)^2 \cdot 0.05m \cdot 0.0237m}{1.5kg \cdot (624s)^2 \cdot 0.7} = 6.41 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$$

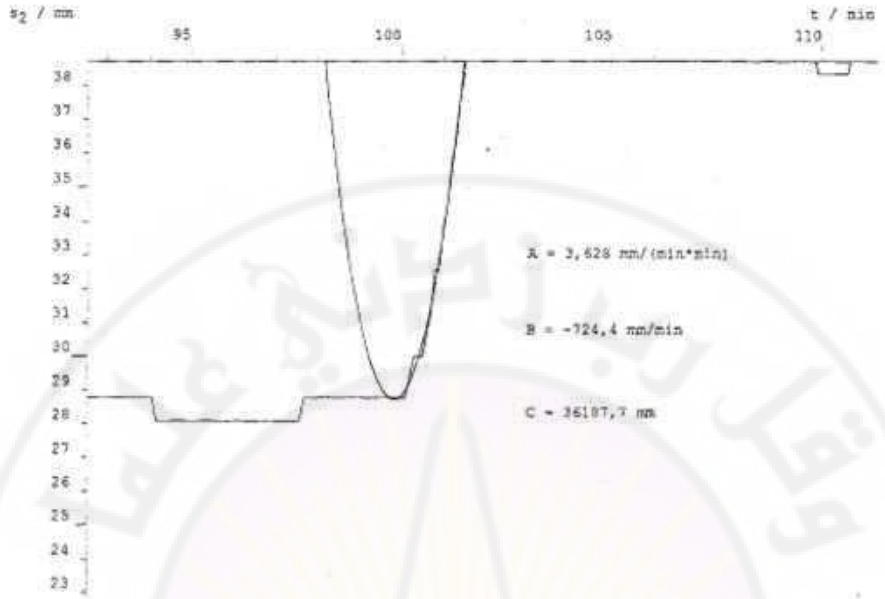
$$= 6.41 \cdot 10^{-11} N \frac{m^3}{kg^2}$$



اهتزازات نواس الفتل المتخامدة التي تظهر على الحاسب عند كل من الوضعين النهائيين

b) طريقة التسارع

لا يستخدم في هذه الطريقة إلّا وضع واحد من الوضعين السكونيين I و II (الشكل5). حيث يتم تقدير تسارع كل من الكرتين الصغيرتين a_0 مباشرة بعد أن تغير الكرتان الكبيرتان اتجاهيهما. ويوصى بتقدير البعد S خلال الدقيقة الأولى.



بتطبيق كل من المعادلات (15) و (16) و (17) و (18) والاستعانة بالشكل التالي على الحاسب نحصل على:

$$A = 3.6\frac{mm}{\min^2} = 1\cdot 10^{-6}\frac{m}{s^2}$$

$$a_0' = 2\cdot 10^{-6}\frac{m}{s^2}$$

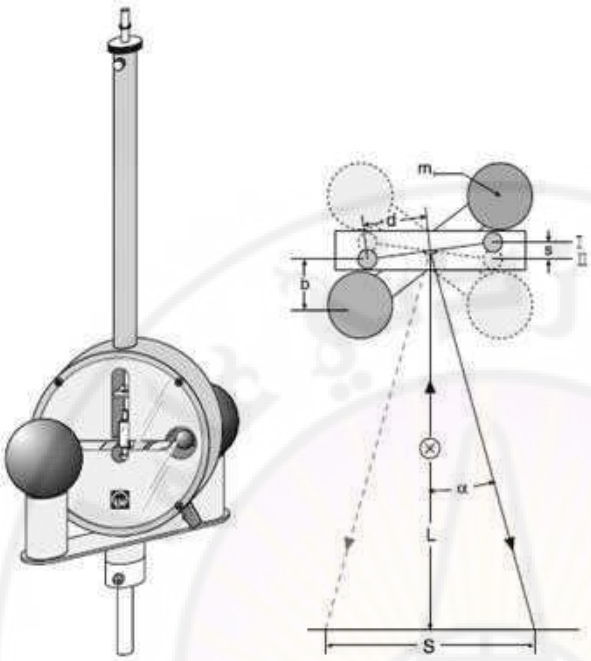
$$G = \frac{a_0 b^2}{2m_1} = a_0'\cdot\frac{d\,b^2}{4m_1 L}$$

$$G = 5.3\cdot 10^{-11}\frac{m^3}{kg\cdot s^2} = 5.3\cdot 10^{-11} N\frac{m^3}{kg^2}$$

ملحق: ميزان الفتل الثقالي

يستخدم ميزان الفتل الثقالي لإظهار قوة التجاذب الثقالي بين الكتل ولتعيين ثابت التجاذب الكوني G.

مبدأ القياس (الشكل1)



الشكل1. ميزان الفتل الثقالي (332101) والمخطط الإجمالي لمبدأ القياس

يضطرب وضع التوازن السكوني I لميزان الفتل الثقالي بدور يقدّر بنحو عشر دقائق بتغير وضع الكتل الخارجية m_1 والتي تؤثر في جسم ميزان الفتل الذي له شكل الدمبل-dumbbell shaped (الدمبل: كرتان حديديتان يربط بينهما قضيب تمرّن بها العضلات). تصبح الاهتزازات متخامدة ويأخذ ميزان الفتل وضعية توازن جديدة (الوضعية II). تعدّ الزاوية بين الوضعيتين مقياساً لقوة الثقالة الفعالة. تحسب α بعد تعيين S والبعد L. يضطرب وضع التوازن السكوني I لميزان الفتل الثقالي بدور يقدّر بنحو عشر دقائق بتغير وضع الكتل الخارجية m_1 التي تؤثر في جسم ميزان الفتل الذي له شكل الدمبل dumbbell-shaped (الدمبل: كرتان حديديتان يربط بينهما قضيب تمرّن بها العضلات). تصبح الاهتزازات متخامدة ويأخذ ميزان الفتل وضعية توازن جديدة (الوضعية II). تعدّ الزاوية بين الوضعيتين مقياساً لقوة الثقالة الفعالة. تحسب α بعد تعيين S والبعد L.

إن اهتزاز ميزان الفتل الثقالي المزود بمرآة مقعرة تدل عليه بقعة ضوئية. إن هذا ممكن باستخدام:

- ضوء مرئي على تدريج ملمتري مباشرة.
- ضوء تحت أحمر يصدر من ثنائيات ضوئية في كاشف موضع بالأشعة تحت الحمراء IRPD infra-red position detector (33211).

يمكّننا هذا الأخير من قياس المواضع التي ستظهر على شاشة حاسب.

1. ملاحظات الأمان

قم بحماية الشريط البرونزي الحساس في ميزان الفتل من الحمولات الميكانيكية غير المضبوطة.

- لا تحرر براغي تثبيت نظام الاهتزاز locking screws (انظر الشكل2) في الميزان قبل تركيبه بشكل صحيح وجعله في وضع التوازن.
- قم دائماً بتثبيت النظام المهتز في ميزان الفتل في حال عدم استخدامه.

تأكد بشكل خاص من أنه مثبت في أثناء النقل والتركيب.

لا يتم تحرير برغي تثبيت رأس الفتل المعقد knurled screw (الشكل2) (والمضبوط في أثناء التسليم) قليلاً إلّا في حال ضرورة ضبط نقطة الصفر بدقة لدى وضع ميزان الفتل المجمع بشكل صحيح في التشغيل.

أما برغي العزقة grub screw (الشكل2) لتثبيت حامل الميزان فلا يحرر إلّا في حال استبدال شريط الفتل الموصوف في الفقرة (3.2).

2. وصف ميزان الفتل الثقالي ومعطياته التقنية وملحقاته

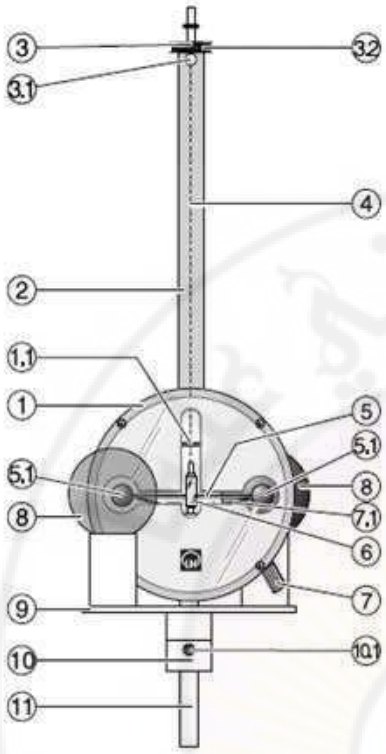
① حجرة معدنية قطرها (.15cm dia)، بحلقة معدنية وأغطية من الزجاج. منزلقة بجزأين (1.1) لمنع التداخل من تيارات الحمل بين الحجرة وأنبوب الحماية (2).

② أنبوب واقٍ (طوله 25cm) لشريط الفتل ④.

③ رأس الفتل مع حامل الميزان، يمكن تدويره لضبط وضعية توازن الميزان لدى حل البرغي (3.1)؛ حامل الميزان مثبت ببرغي عزقة grub screw (3.2).

من المهم ألّا تحل البرغي المعقد knurled screw (3.1) ما لم يكن ضرورياً إجراء ضبط نقطة الصفر وفقاً للفقرة 3.5، ولا تحل برغي العزقة (3.2) إلّا في حال استبدال شريط الفتل على النحو الموصوف في الفقرة 4.

④ شريط الفتل مصنوع من البرونز طوله 26cm، ورقمه في الكاتالوغ no:68321.



الشكل2

⑤ جسم الميزان بشكل الدمبل والذي يتكون من كرتين من الرصاص (5.1) مثبتتين على قضيب معدني.

⑥ مرآة مقعرة لعكس البقعة الضوئية على طول البعد البؤري لحركة الميزان f والذي يقدّر بنحو 30cm.

⑦ براغي تثبيت جسم الميزان ⑤ باستخدام زوج من النوابض (7.1).

⑧ زوج من الكرات الرصاصية الكبيرة ورقمها68322

⑨حامل الكرة، يمكن تدويره حول القضيب القائم

⑪ في حالة الترتيب التجريبي الصحيح في حالة الكرات الرصاصية الكبيرة⑧.

⑩ حلقة استناد ببراغي تثبيت (10.1) بحامل الكرة.

⑪ قضيب استناد (9cm × 1.2cm dia.) لتركيب

الأداة في مادة الاستناد تضم الملحقات: شريط التصاق ذاتي مدرج بالسنتمتر وبالملمتر.

المعطيات التجريبية المهمة

عمق الحجرة 30mm، ميزان الفتل، دوره 10min، قطر الكرة الرصاصية (5.1) m_2 يساوي 15mm وكتلتها 20g، البعد بين مركز الكرة ومحور الدوران 50mm، قطر الكرة الرصاصية الكبيرة ⑧m_1 يساوي 64mm وكتلتها $1.5kg \pm 5g$، البعد بين مركز الكرة الكبيرة (عندما يتم التماس مع الحجرة) والكرة الصغيرة (وضعية التوازن) $47mm$.

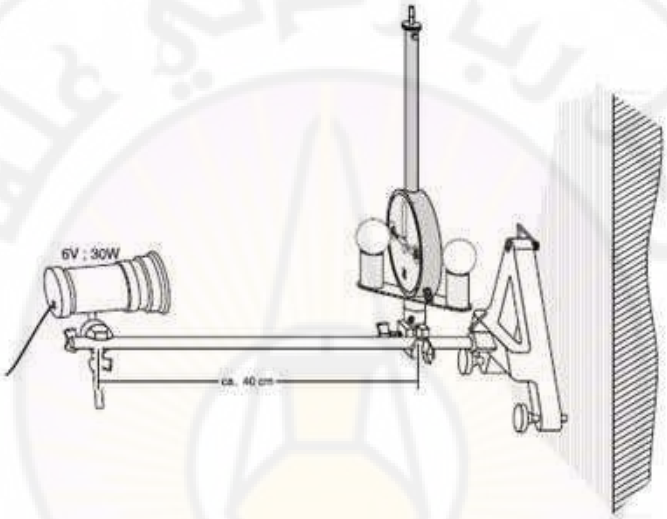
3. تشغيل الميزان

حتى يتم الحصول على نتائج تجريبية مقنعة يجب ضبط ميزان الفتل بشكل ملائم ومن دون أن تتأثر اهتزازات ميزان الفتل المتولدة نتيجة للتجاذب بين الكتل بحركات الميزان غير المرغوب فيها. والميزان شديد الحساسية لأي اضطراب في تركيب التجربة: تأكد من أن تركيب التجربة مستقر تماماً، أي بربطها إلى حائط مستقر أو وضعها على جسر أو منضدة ثابتة.

تؤدي تغيرات درجة الحرارة إلى الحمل في حجرة ميزان الفتل والتي تسبب تغيرات غير مرغوب فيها لميزان الفتل (انظر الشكل6). لهذا السبب، اختر موقع التجربة بحيث لا يقابل أشعة الشمس مباشرة أو التيارات الهوائية.

1.3. أجهزة أخرى مطلوبة

1.1.3. بقعة اهتزاز باستخدام علامات ضوء مرئي على تدريج ملمتري

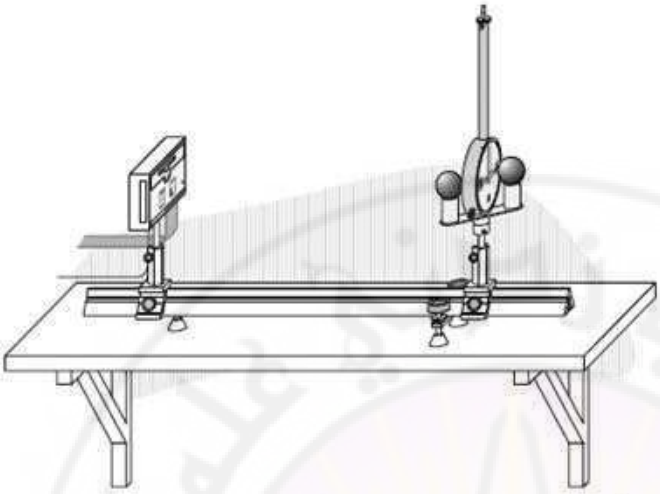


الشكل3. تركيب ميزان الفتل الثقالي، عرض منحني الاهتزاز عن طريق بقعة ضوئية (مرئية) على تدريج ملمتري (غير مناسب لكاشف الموضع تحت الأحمر 33211).

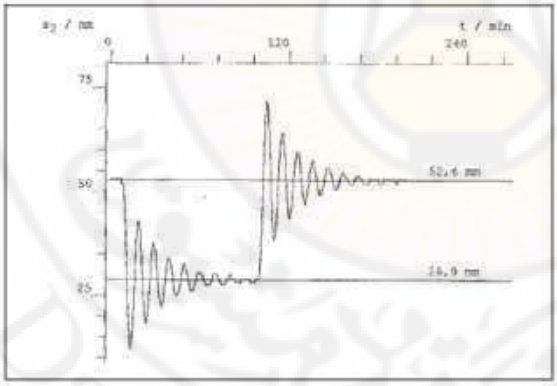
حجرة مصباح 45060، مصباح $6V, 30W$ 45051، مكثف لا كروي، (حاجز بشق 1- (mm 46020 ، منبع كمون متناوب 6V,30W 56273 مثلاً، مقياس للأطوال على شكل شريط فولاذي بطول 2m 31177، ساعة إيقاف 31305، مغنطيس معلق 51044، مجموعة حائطية (انظر الشكل3)،قاعدة انتصاب كبيرة 30031، زوج من براغي التسوية 30006، ملقط متعدد لا يبولد30101، ملقط قابل للدوران 30103، قضيب استناد 30042، مجموعة من الأدوات المساعدة وقطع التبديل: حفارة كهربائية، قطاعات حفارة البناء، قوابس جدران (6mm).

2.1.3 رسم الاهتزاز بمسجل أو تسجيل الاهتزاز بمساعدة الحاسب باستخدام ضوء تحت أحمر؛ مجموعة سكك على جسر (الشكل4).

كاشف موضع تحت أحمر 33211، منبع كمون متناوب 12V مثلاً 56273، مسجل 575701 أو حاسب MS DOS عن طريق وصلة بينية تسلسلية، كابل RS232، برنامج بالإعدادات الافتراضية للتجربة النوعية مثلاً المتضمنة في "Universal Data Acquisition" لاقتناء المعطيات العامة المتضمنة في ملحقات كاشف الموضع (33211)؛ انظر المثال التجريبي في الشكل4.1 أو حاسب MS DOS بوصلة بينية MS DOS computer with interface CASSYpack-E 524007، برنامج القياس والتقييم 524112، شريط فولاذي للقياس31177، مغنطيس معلق 51044، جسر ضوئي 1m 46032، ملحقان ضوئيان مثلاً 460351، قضيب قائم طوله 25cm 30041 .



الشكل4. مجموعة الجسر العلوية لميزان الفتل الثقالي؛ التعيين الإلكتروني لمنحني اهتزاز ميزان الفتل الثقالي باستخدام كاشف الموضع تحت الأحمر(33211). التسجيل بمسجل TY- أو معالجة متقدمة بمساعدة الحاسب (انظر الشكل 4.1).



الشكل4.1 تسجيل اهتزازات ميزان الفتل الثقالي بمساعدة الحاسب

ملحوظة. يمكن إيجاد المزيد من المعلومات عن استخدام ميزان الفتل الثقالي بالاستعانة بالحاسب

2.3. تركيب القاعدة القائمة على الحائط (يلزم تركيبها على الحائط على النحو المبين على الشكل5 قبل استخدام التركيب لأول مرة

ملاحظة مهمّة. إن تركيب مادة الحامل على الحائط غير مناسب لتركيب التجربة التي تعتمد على كاشف الموضع 33211 (انظر الفقرة 3.1.2 الشكل4).

قم بتركيب القاعدة الحامل من خلال فتحة ذروتها، على النحو المبين في الأشكال من 5.1 إلى 5.3



الأشكال 5.1 إلى 5.3 تركيب القاعدة الداعمة على الحائط

3.3 إعداد التجربة

ركّب تجربة ميزان الفتل الثقالي على الحائط في بادئ الأمر من دون كرات رصاصية، على النحو المبين في الشكل3 (أو بالمثل على الجسر الضوئي فوق جسر مختبر قوي sturdy).

قم بتوجيه حجرة مصباح الإضاءة بحيث يتم إسقاط حزمته المنعكسة عن المرآة المقعرة في الميزان من دون عائق على التدريج، الذي يجب وضعه على بعد خمسة أمتار على الأقل.

قم بتوجيه فتيل المصباح بحيث يكون شاقولياً قبل إلحاق المكثف وحامل الحاجز والشق (شاقولياً) بحجرة المصباح.

حرك الجسم المدْخَل في حجرة المصباح بحيث يتم إسقاط صورة مبأرة للفتيل على مرآة ميزان الفتل. وللقيام بذلك احمل صفيحة بيضاء من الورق، تتشكل عليها صورة للفتيل أمام الميزان مباشرة.

حرك حجرة المصباح بحيث يتبأر الشق على التدريج. قم بتعديل نقطة الصفر في حال الضرورة على النحو الموصوف في الفقرة 3.5.

ضع الكرتين الرصاصيتين الكبيرتين على الحامل الخاص بهما الذي يجعل في وضعيته القصوى. احرص لدى إجراء هذه الخطوة بألّا تلامس أصابعك أو الكرتان الزجاجيتان الحجرة.

تركيب ميزان الفتل قبل استخدامه

– أدخل برغي 8mm بقوة في الحائط. وعلق القاعدة الحاملة من ثقب في رأسها، وقم بتوجيهها بحيث توازي الحائط باستخدام براغي الضبط (اقرأ ورقة التعليمات).

– ثبت القضيب الداعم في القاعدة.

– علق ميزان الفتل الثقالي (من دون الكرات الرصاصية الكبيرة) بحيث يوجد فضاء كافٍ لإدارة الذراع الداعمة للكرات الرصاصية.

– قم بتوجيه ميزان الفتل الثقالي بحيث يكون شاقولياً قدر الإمكان. والصفيحة الزجاجية للحجرة موازية للحائط من أجل التدريج.

– حرِّر ميزان الفتل وصحح توجيهه بحيث يتعلق الدبوس في نهاية الميزان في مركز ثقب القضيب ويمكن لميزان الفتل أن يهتز بحرية.

– اترك ميزان الفتل معلقاً يوماً أو يومين ثم قم بإعادة ضبط نقطة الصفر في حال الضرورة (اقرأ ورقة التعليمات).

البقعة الضوئية

– ركِّب الليزر بمثبت دوّار على بعد نحو 35cm من ميزان الفتل وقم بتوجيهه على المرآة المقعرة. تأكد من أن الكرتين الرصاصيتين الكبيرتين لا تعترضان مسار البقعة الضوئية في الوضعية *I* أو الوضعية *II*. – اربط الكرتين الرصاصيتين وقم بتدوير الذراع الحاملة إلى الوضعية *I*. – تأكد من التوجه الشاقولي للتركيب.

ملحوظة: يقدّر البعد بين الوضعيتين الطرفيتين للتدريج على بعد نحو 10m بين ميزان الفتل والتدريج، بنحو 35cm، في حين يقدَّر المجال الكلي الذي تغطيه البقعة الضوئية بنحو 1m.

– الصق التدريج أفقياً على الجدار المطلوب أو على قاعدة ثابتة بحيث يكون موضع البقعة الضوئية I عند نحو 35cm أو يكون موضع البقعة الضوئية II عند نحو 65cm.

4.3 إجراء التجربة : مثال تجريبي

ملحوظة مهمة. يجب بعد إعداد التجربة على النحو المذكور في الفقرة السابقة، أن تترك ساكنة لساعتين على الأقل بحيث يستقر الميزان في حالته التوازنية.

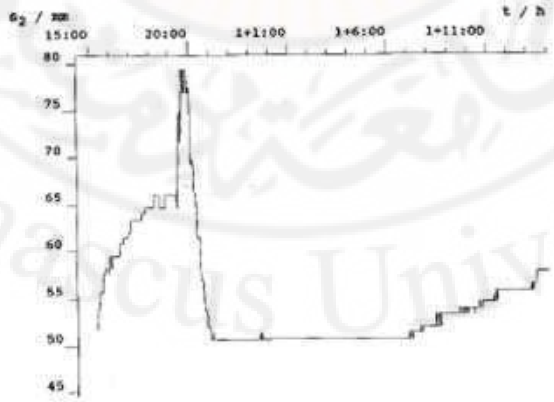
قم بتدوير حامل الكرة⑨من دون ملامسة الحجرة.

لتقصير مدة الاستقرار، استفد من المغنطة المعاكسة للرصاص: ففي كل مرة تقترب إحدى كرتي الميزان من الغطاء الزجاجي، hold up مغنطيس قوي – من دون ملامسة الزجاج – إلى أن تنعكس حركة الجملة. يجب عدم تعريض تركيب التجربة لأي صدمة أو تغير في درجة الحرارة يمكن أن تسبب الحمل convection في حجرة ميزان الفتل لدى تسجيل القيم المقيسة.

تفقَّد استقرارية نقطة الصفر قبل بدء القياس. راقب في حال الضرورة ولاحظ ترنحات نقطة الصفر لعشر دقائق على الأقل بحيث تتمكن من تعيين نقطة وسطية لـ x_0.

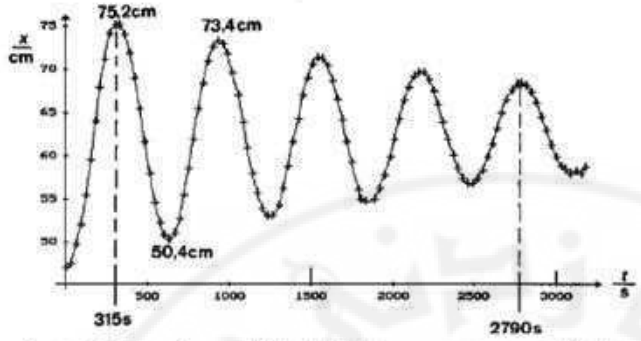
في اللحظة $t = 0$، قم بتدوير حامل الكرتين الرصاصيتين الكبيرتين بسرعة من أحد الوضعين القصويين إلى الآخر. احرص لدى إجراء هذه الحركة ألّا تلامس أصابعك أو الكرات الرصاصية الحجرة. ابدأ ساعة الإيقاف فوراً بعد إزاحة الحامل.

اقرأ Read off ولاحظ موقع البقعة الضوئية على التدريج كل 30s (الشكل6) لثلاثة أدوار على الأقل لدى استخدام طريقة الإزاحة الطرفية (السكونية) ولدور واحد لدى استخدام طريقة التسارع (الطريقة الديناميكية).



الشكل6

مثال تجريبي



الشكل7. اهتزازات ميزان الفتل الثقالي حول وضعية التوازن النهائية x_{00}.

ثوابت التجهيزات: كتلة الرصاص الكبيرة $m_1 = 1.5kg$، البعد بين مركز الكرة ومحور الدوران $d = 0.05m$، البعد بين مركز الكرة الكبيرة (لدى ملامسة الحجرة) والكرة الصغيرة (في وضعية التوازن): $b = 0.047m$، البعد بين التدريج وميزان الفتل: $L = 4.425m$، دور الاهتزاز T (الشكل7).

$$T = \frac{(2790 - 315)s}{4} = 618.8s$$

وضع التوازن الابتدائي: $x_0 = 47cm$، وضع التوازن النهائي x_{00} (يحدد من ثلاثة حدود قصوى) مثلاً:

$$x_{00} = \frac{\frac{x_1 + x_3}{2} + x_2}{2} = \frac{x_1}{4} + \frac{x_2}{2} + \frac{x_3}{4} = 62.3cm$$

إن الفارق S بين وضعي البقعة الضوئية في حالتي الوضعين الابتدائي والنهائي للميزان:

$$S = x_{00} - x_0 = 62.3cm - 47cm = 15.3cm$$

وبالتعويض في المعادلة (1) في طريقة الانحراف الطرفي نحصل على ثابت التجاذب الكوني:

$$G = \frac{\pi^2 \cdot (0.047m)^2 \cdot 0.05m \cdot 0.153m}{1.5kg \cdot (618s)^2 \cdot 4.425m}$$
$$= 6.5610^{-11} m^3 kg^{-1} s^2$$

5.3. ضبط نقطة الصفر

إن الغرض من ضبط نقطة الصفر هي وضع ميزان الفتل بحيث يتجه جسم الميزان⑤ الذي له شكل الدمبل (انظر الشكل2) موازياً لصفيحتي زجاج حجرة الميزان في وضع التوازن.

إن عملية ضبط ميزان الفتل الثقالي ضرورية ربما قبل أول استخدام له إذا طرأ أي تغيير على ضبط الشركة المصنّعة، كنتيجة للنقل، بعد تداوله بشكل غير سليم (من خلال تدوير غير نظامي لرأس الفتل)، ③ بعد إدخال شريط فتل جديد كما ذكرنا في الفقرة 4.

التحضير لضبط نقطة الصفر

ركّب ميزان الفتل بحيث تكون منظومة البقعة الضوئية على جسر المختبر على النحو المذكور في الفقرة3.3 (أو وفقاً للمعلومات الموافقة لورقة التعليمات (33211))، ولكن من دون الكرات الرصاصية الكبيرة. حرر ميزان الفتل unlock بحل البراغي ⑦ (انظر الشكل 2). باستخدام براغي التسوية على القاعدة الحاملة (أو على الجسر الضوئي)، قم بتسديد ميزان الفتل بحيث يتعلق ميزان الفتل شاقولياً (تأكد فيما إذا كان الدبوس في طرف الميزان معلقاً في محور الثقب).

ضبط نقطة الصفر

ثبت ميزان الفتل بالبرغي⑦ وقم بإعداد ميزان الفتل في موقع التجربة (التركيب على حائط على النحو المبين في الشكل3)؛ ثم حرر الميزان ودعه يتحرك. لاحظ الانحرافات الطرفية للبقعة الضوئية إلى جانبي التدريج.

راقب وضعية التوازن التي تسعى إليها الجملة؛ لتقصير زمن المراقبة اجعل الاهتزازات تتخامد بالمغنطة المعاكسة. ففي كل مرة تقترب فيها إحدى كرتي الميزان الرصاصيين من الزجاج استخدم مغنطيساً قوياً لعكس حركة الجملة من دون ملامسة للزجاج.

ولأنه يترتب على البقعة الضوئية أن لا تبدي ميلاً نحو وضع توازن يقع تقريباً في المركز بين نقطتي الاتجاهين المتعاكسين الملاحظين (3.1)، قم بحل البرغيين العقديين③وبتدوير رأس الفتل بزاوية صغيرة في اتجاه نقطة الصفر المرغوبة.

راقب مرة ثانية الانحرافين الطرفيين وميل البقعة الضوئية لنقطة الصفر. استمر بهذا الضبط لنقطة الصفر إلى أن يتم التوصل إلى وقوع نقطة الصفر المرغوبة في منتصف المسافة بين النقطتين اللتين تعكس البقعة الضوئية عندهما اتجاهها.

4. استبدال شريط الفتل

يمكن استبدال شريط فتل جديد بالشريط المقطوع؛ يتم تزويده بحالة جاهزة للتركيب كقطعة تبديل(68321) . تجري عملية التبديل على النحو التالي:

التحضير

ركّب ميزان الفتل (بحيث لا يكون جسم الميزان حر الحركة) على قاعدة حاملة 300 01/06 يمكن ضبط استوائيتها بحيث يكون الطرف الخلفي في المقدمة؛ وللتأكد من تداوله بأمان ثبت الأنبوب الواقي لشريط الفتل المبدل بملقط (الشكل7).

- انزع البرغي (a_1) ثم حل البراغي الأخرى التي تثبت صفيحة الزجاج على التتالي إلى أن يصبح نزعها ممكناً (الشكل8.2).
- انزع الصفيحة الزجاجية (a_2) والسدادة الكرتونية cardboard seal (a_3) واسحب القطعة الأمامية من المنزلقة الكرتونية (a_4).

نزع شريط الفتل التالف

- حل البرغي المحزز grub screw (b_1) في الوقت الذي يتم فيه الإمساك بحامل الشريط (b) بقوة. انزع حامل الشريط (الشكل8.3).
- في حال انقطاع شريط الفتل، انزع الجزء الطرفي (c) (الشكل8.4).

إدخال شريط الفتل الجديد

- حل البرغي x_1 وانزع البرغي x_2 في الوقت الذي يتم فيه الإمساك بحامل الشريط (B) بقوة.
- انزع بحذر شديد الجملة من الغطاء الواقي وأدخلها في ميزان الفتل إلى أن يتعلق الجزء الطرفي (C) أعلى الثقب c_2 بمقدار 1 إلى 2 ملمتراً. تأكد بأن شريط الفتل الشديد الحساسية لا يلامس الجدران. قم بعد ذلك بتثبيت حامل الميزان (B) بشد البرغي b_1 (الشكل8.6).

- انتظر إلى أن يستقر شريط الفتل. استخدم في حال الضرورة براغي التسوية على القاعدة الحاملة لتوجيه شريط الفتل بحيث يتعلق الجزء الطرفي (C) شاقولياً فوق الثقب.

- حل البرغي b_1 امسك حامل الشريط (B) بقوة واخفضه عدة ملمترات _من دون تعرضه للاهتزاز (C) إلى أن يتوجه الجزء الآلي machined من الجزء الطرفي في داخل الثقب (c_1) بشكل كامل؛ لا تحرر حامل الشريط إلى أن يتم تثبيته بعناية في مكانه بشد البرغي المحزز b_1 (الشكل8.7) ؛ أخيراً ثبت القطعة الطرفية (C) بالبرغي (c_1).

- أدخل الزالقة الكرتونية (a_4). بعد إعادة إدخال القرص الساد (a_3) والصفيحة الزجاجية (a_2) بشكل صحيح، أعد إغلاق الحجرة بالبرغي (a_1).

بعد تركيب ميزان الفتل، حرره وتحقق فيما إذا كان جسم الميزان يتحرك بحرية؛ ولوجوب وقوع شريط الفتل على نوابض التثبيت على الرغم من تحريره، ارفع حامل الشريط قليلاً (B)، وحله بالبرغي(b_1)، ثم ثبته ثانية في مكانه.

يجب أن يكون ميزان الفتل معلقاً من دون اضطراب undisturbed مدة اثنتي عشرة ساعة على الأقل قبل إجراء عملية ضبط نقطة الصفر على النحو الموصوف في الفقرة 3.5.

تعليمات إضافية 332101

لحماية شريط الفتل الحساس في أثناء النقل، تم تخفيض الجملة المهتزة في ميزان الفتل الثقالي. وقبل أن تتمكن من استخدام الميزان يجب أولاً تنفيذ الخطوات التالية، بالإضافة إلى التعليمات الواردة في ورقة التعليمات.

أولاً ركب الميزان شاقولياً من دون الكرتين الرصاصيتين الكبيرتين على قاعدة حاملة.

قم بحل برغيي تثبيت ⑦ جسم الميزان بشكل كامل (الشكل2) بحيث تنحل ملاقط التثبيت. حل برغي العزقة (3.2) من دون تدوير البرغي المحزز.

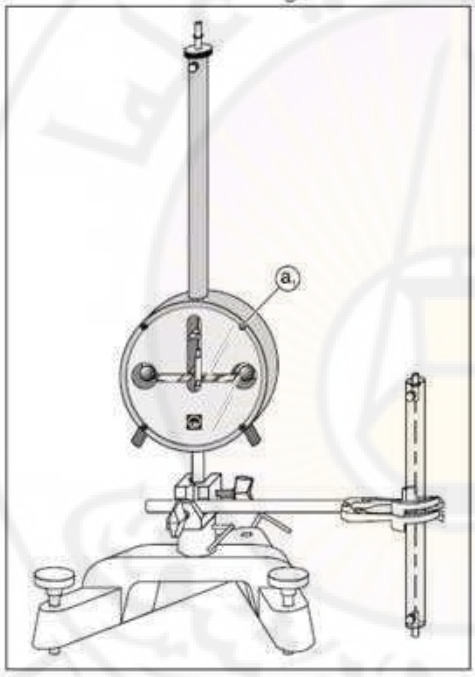
ثبّت حامل الشريط (b)، الشكل 8.3 بحيث لا يفتل.

اسحب بعناية ماسك الشريط (b)، الشكل8.3 وراقب حركة جسم الميزان الذي له شكل الدمبل ⑤ (الشكل2). ارفع جسم الميزان إلى أن تصبح كرتا الميزان الرصاصيتان الصغيرتان

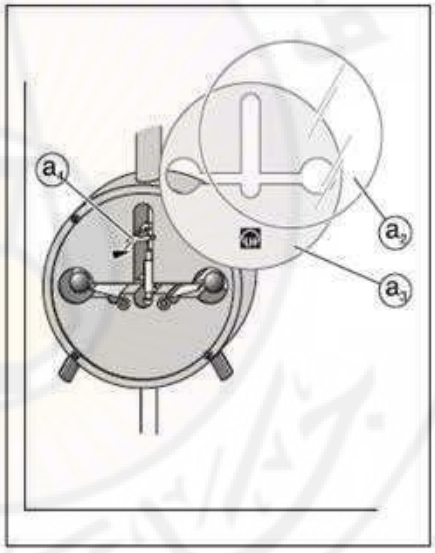
في وسط النافذة المدورة. إذا سحب ماسك الشريط بعيداً بحيث يلامسه جسم الميزان ينقطع شريط الفتل.

حاول عدم فتل ماسك الشريط، لأن ذلك يتطلب إعادة ضبط نقطة الصفر (انظر الفقرة 3.5 من ورقة التعليمات).

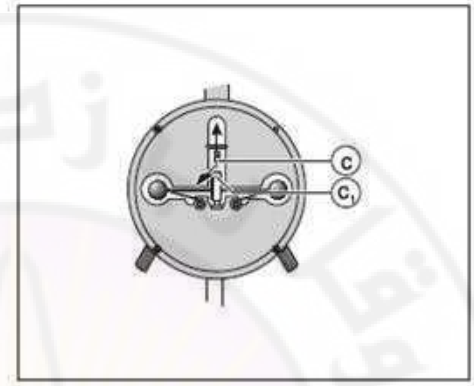
أعد شد البرغي المحزز (3.2) (الشكل2). أعد في حال الضرورة ضبط نقطة الصفر. ارجع لورقة التعليمات من أجل الخطوات اللازمة الأخرى لإعداد ميزان الفتل.



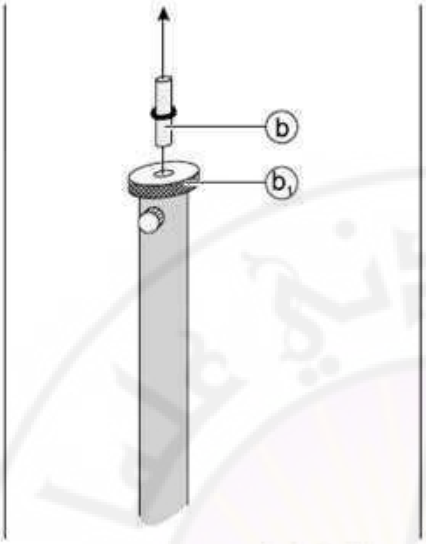
الشكل 8.2



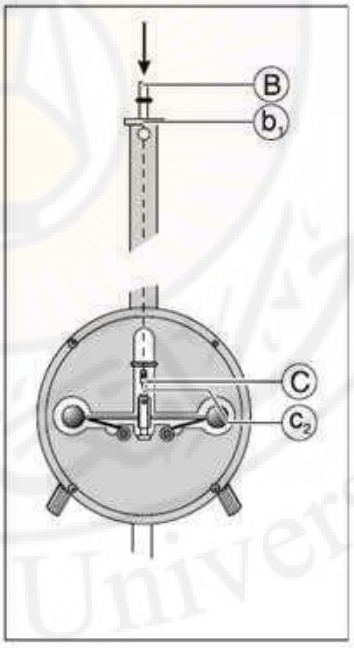
الشكل 8.1



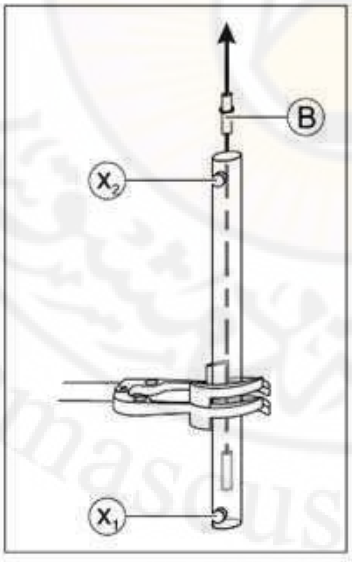
الشكل 8.3



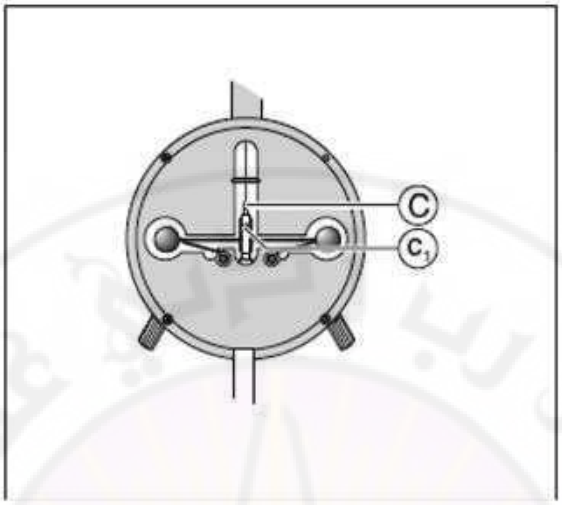
الشكل 8.4



الشكل 8.5



الشكل 8.6



الشكل 8.7

Damascus University

تجارب للإراءة: الأمواج المائية

حوض الأمواج والستروبوسكوب ذو المحرك

يستخدم حوض الأمواج الذي يترافق بستروبوسكوب (مقطّع آلي للضوء) Wave Trough with Motor Stroboscope في إظهار أمواج الماء السطحية. لتوليد هذه الأمواج يتم نقل اهتزازات غشاء يقع في وحدة التغذية إلى سطح الماء، من خلال تغيرات في ضغط الهواء عن طريق مولد لاهتزازات مختلفة. يمكن تغيير تواتر منبع الاهتزاز بين 10Hz و 80Hz كما يمكن توليد نبضة موجية.

لإظهار صورة الأمواج المستقرة يجعل تواتر تقطيع الضوء في الستروبوسكوب متزامناً مع تواتر غشاء منبع الاهتزاز. يمكن وضع حوض الأمواج على جهاز الإسقاط مباشرة بحيث تظهر صور الأمواج المتحركة مكبرة جداً.

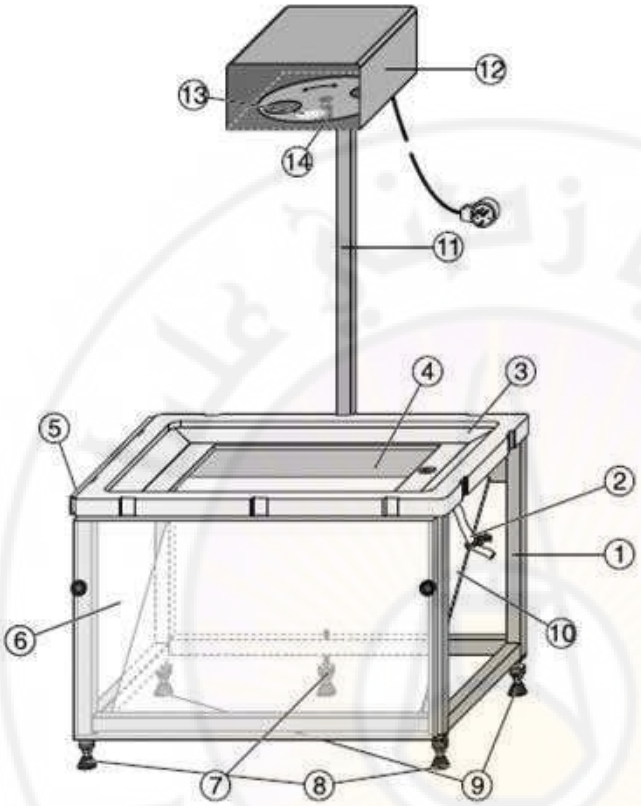
أمثلة عن التجارب التي يمكن إجراؤها بهذا الجهاز:

- صدور الأمواج المستقيمة والأمواج الدائرية.
- سرعة انتشار الأمواج المائية.
- انعكاس الأمواج المائية.
- تداخل الأمواج المائية.
- مفعول دوبلر.
- تداخل حزمتين من الأمواج المائية.
- الانعراج والتداخل .

10. ملاحظات الأمان:

- تأكد عند نقل الجهاز بأن المرآة غير المثبتة داخل الإطار لن تسقط منه.
- بعد الانتهاء من التجربة جفف بعناية قعر الزجاج وجميع الأجزاء التي تلامس الماء.
- قبل ضبط المستوى الأفقي للجهاز بكل من الحوامل (7) و (8) الثلاثية نقاط الارتكاز، ادفع الحوض للأسفل (3) في الإطار (1) عند الزوايا الأربع .
- إذا كان جهد تشغيل الجهاز مختلفاً عن جهد بلدك فأعد الجهاز لشركة لايبولد لتحويله.

2. وصف حوض الأمواج المائية ومعطياته الفنية وملحقاته



الشكل1

(1) إطار *50cm*36cm 32cm

(2) أنبوب تصريف للمياه الزائدة مع حابس

(3) حوض مائل الحواف لحذف التداخل الناجم عن الانعكاس

(4) لوح زجاجي 30cm *19cm

(5) سكة لتعليق حوامل (30) منابع الأمواج الدائرية (31)

(6) شاشة مراقبة من البليكسي غلاس plexiglass (مادة بوليميرية) 30cm*19cm

(7) قدم مع مفتاح ضبط لحامل ثلاثي النقط.

(8) – قدما تسوية ببراغي ضبط للحاملين الثلاثي النقط.

(9) – قدما تثبيت بمفتاح ضبط (لتثبيت المستوى الأفقي الذي سبق ضبطه بكل من الحوامل الثلاثية النقط (7) و(8)).

(10) – مرآة عاكسة 48cm*33.5cm .

الستروبوسكوب (مقطّع الضوء) (الشكل 1)

(11) – حامل ببرغيي تثبيت

(12) – ستروبوسكوب يضم مصباحاً هالوجينياً (12V/55w) لإضاءة حوض الأمواج وقرصاً مقطّعاً للضوء، ومحركاً لمقطّع الضوء وكابلاً بقابس خاص لوصله بمقبس DIN (24).

(13) – نافذة للضوء بعدسة مقربة.

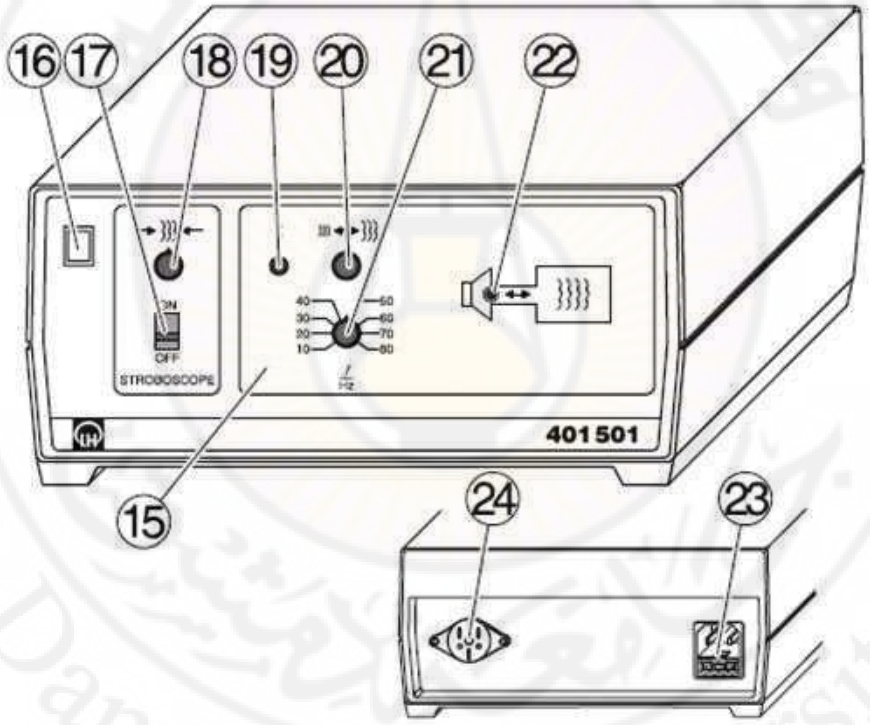
(14) – مفتاح بعقدة لتدوير القرص المقطّع للضوء يدوياً، بحيث لا يعترض الضوء لدى إطفاء الستروبوسكوب.

وحدة التغذية (الشكل2)

(15)– وحدة تغذية 230VAC أو 115VAC (50/60Hz) (بحسب لوحة التقديرات Rating plate خلف وحدة التغذية) بما في ذلك الكابل الذي يصلها بمنبع تيار المدينة).

(16) – قاطعة (بدليل ضوئي) لمنبع التغذية.

(17) – قاطعة للستروبوسكوب.



الشكل2

(18) – مفتاح للتحكم في تواتر الستروبوسكوب بدقة (لينسجم مع تواتر منبع الاهتزاز الذي يتم اختياره عن طريق المفتاح العقدي (21)).

(19) – زر ضغط لتوليد نبضات أحادية من الأمواج

(20) – مفتاح للتحكم في سعة منبع الاهتزاز

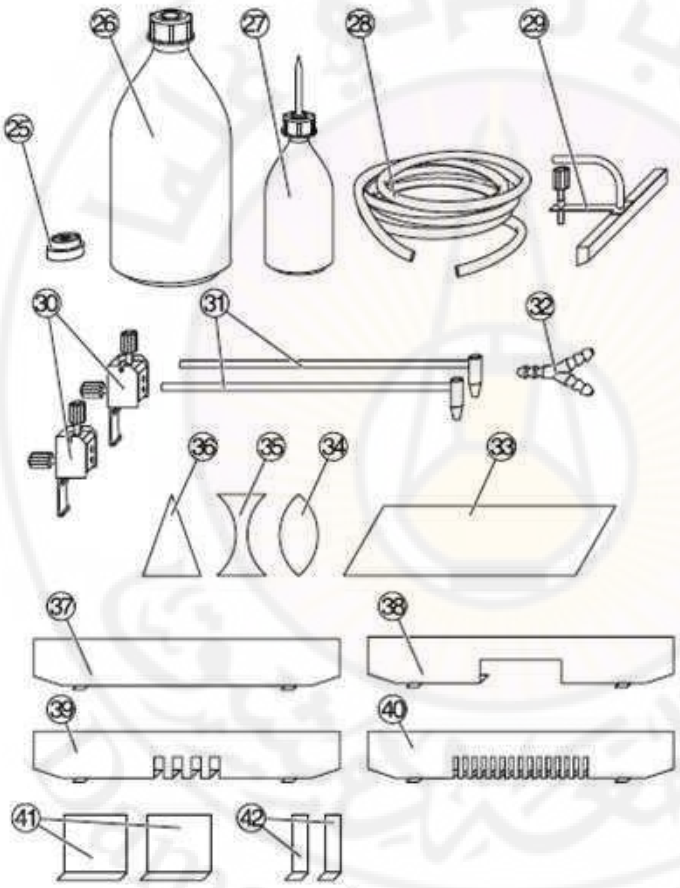
(21) – مفتاح للتحكم في تواتر منبع الاهتزاز (وتواتر الستروبوسكوب).

(22) – فوهات لخروج النبضات الهوائية التي تتدفق من خلال الأنبوب (28) .

(23) – مقبس لكابل منبع تيار المدينة، حامل الفاصمة الأساسية والاحتياطية.

(24)– مقبس DIN لكابل الستروبوسكوب

ملحقات الجهاز (الشكل3)



الشكل3

(25) – ميزان تسوية لحوض الأمواج

(26) – قارورة بلاستيكية سعتها لتر واحد

(27) – قارورة بلاستيكية لسائل الجلي (لتخفيض التوتر السطحي)

(28) – أنبوب لنقل تغيرات ضغط الهواء

(29)– منبع لتوليد الأمواج المستقيمة عرضه 19cm.

(30) – حاملان لمنبعي الأمواج الدائرية يوصلان بالسكة (5) .

(31) – منبعان للأمواج الدائرية.

(32) – وصلة خرطومية على شكل الحرف Y لوصل الأنبوب (28) بمنبعي الأمواج الدائرية

قطع تجارب الانكسار (الشكل 3)

– ضع حوض الأمواج (3) على الإطار (1) من الأعلى واضغطه للأسفل من الزوايا الأربع

(33) – صفيحة متوازية الوجهين من زجاج الأكريليك الشفاف

(34) – عدسة محدبة الوجهين من البلاستيك

(35) – عدسة مقعرة الوجهين من البلاستيك

(36) – موشور من البلاستيك

حواجز تجارب التداخل والانعراج (الشكل3)

(37) – حاجز عاكس

(38) – حاجز بشق كبير عرضه 71mm

(39) – حاجز بأربعة شقوق عرض كل منها 7mm والبعد بين كل شقين متتالين 14mm

(40) – حاجز بخمسة عشر شقاً، عرض كل منها 4mm، والبعد بين كل شقين متتالين فيها 8mm .

(41) – غطاءان للشقوق قابلان للانزلاق، عرض كل منهما 55mm .

(42) – غطاءان للشقوق قابلان للانزلاق، عرض كل منهما 12mm .

3. تشغيل الجهاز

قم في حال الضرورة بإزالة غطاء الحماية الرقيق عن الأجسام من (33) حتى (36) وعن الحواجز من (37) حتى (42) وعن شاشة المراقبة (6) .

– قم بتحضير أنبوب نقل النبضات – (عند استخدام جهاز الإسقاط، ضع حوض الأمواج مباشرة على سطحه) .

1. إعداد التجهيزات لاستخدامها لأول مرة

a) حوض الأمواج

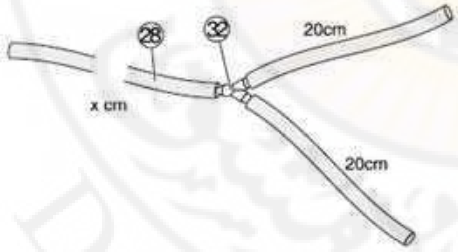
– أدخل مرآة الإسقاط (10) بين أقدام الجهاز بحيث تستند على دعائمه من دون تثبيت.

– قم بتركيب شاشة المراقبة (6) على الوجه الأمامي للإطار باستخدام برغيين بعقدة (الشكل1)

– ثبت الحامل العمودي (11) بشدة خلف الإطار.

– ثبت الستروبوسكوب (12) على الحامل الشاقولي.

b) أنبوب نقل النبضات الهوائية



الشكل4

الهوائية (28) أولاً: اقطع قطعتين منه طول كل واحدة 20cm (الشكل4) لتوصيل منبعي الأمواج الدائرية (30) بالوصلة (32)

2. تحضير أجهزة التجربة

- قم بتهيئة حوض الأمواج بحيث لا يخضع للصدمات.
- **من المهم جعل حوض الأمواج أفقياً ما أمكن في تجارب الانكسار من خلال الأجسام.**
- ضع ميزان التسوية (25) على اللوح الزجاجي (2) في حوض الأمواج وقم بضبط أفقيته عن طريق قدمي التسوية (8). عندها يثبت الحامل الثلاثي النقط (7). ربما ترتفع قدما التثبيت (9) عن سطح طاولة المختبر في أثناء عملية التسوية. قم بعد عملية التسوية بجعلهما تلامسان الطاولة باستخدام برغييهما من دون التأثير على أفقية الحوض.
- أغلق أنبوب تصريف المياه (2) بالحابس.
- املأ حوض الأمواج بالماء.

مستوى الماء

في تجارب الانكسار: يكفي أن يكون مستوى الماء أعلى بمقدار 1mm بالنسبة للأجسام المستخدمة في الانكسار.

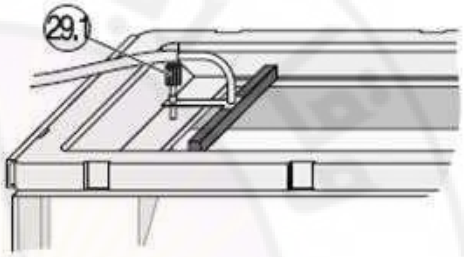
a) **تحضير الحوض للأمواج المستقيمة** في حالة منبعين للأمواج الدائرية استخدم

- في التجارب الأخرى جميعها: نحو 5mm.
- قم بتخفيض التوتر السطحي للماء بقطرة من سائل الجلي لجعل التشويش الناتج عن الانعكاس أصغر ما يمكن.
- قم بتوصيل أنبوب نقل النبضات الهوائية (28) بفوهات خروجها (22).
- قم بتوصيل كابل الستروبوسكوب (12) بالمقبس (24) وقم بتشغيل وحدة التغذية بالمفتاح الأساسي (16).
- قم في حال الضرورة بتدوير قرص الستروبوسكوب بعيداً عن مسار الحزمة الضوئية بالمفتاح العقدي (14).

3. توليد الأمواج

من المهم في كل تجربة ضبط عمق منابع الاهتزاز في الماء وتواتراتها ومطالاتها بدقة، وغالباً ما يمكنك تحسين صورة الظواهر التي ترغب بمراقبتها بتغيير هذه المتحوّلات. لدى تغيير تواتر الاهتزاز قد تحتاج لتغيير مطال الاهتزاز أيضاً، الأمر الذي يسمح بعرض صورة الأمواج وفق مساحات مختلفة ومبأرة الأشكال (في تجارب الانعراج والانعكاس).

قم بتوصيل أنبوب نقل النبضات الهوائية (28) بوصلة منبع الأمواج المستقيمة (29) الذي يوضع في حوض الأمواج. قم بتخفيض منبع الأمواج المستقيمة بإعمال المفتاح (29.1) لمجرد ملامسة حافته السفلية سطح الماء (الشكل5).



الشكل5

b) تحضير الحوض للأمواج الدائرية

علق الحامل (30) بالسكة (5) واربط منبع الأمواج الدائرية (31) باستخدام المفتاح العقدي (30.1). ثم قم بتوصيل أنبوب نقل الاهتزاز (28).

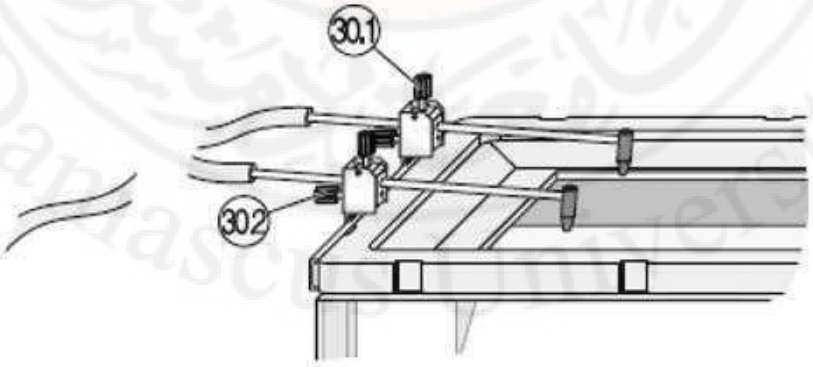
الوصلة ذات الشكل Y والأنبوبين القصيرين (نحو 20 سنتمتراً، انظر الشكل4).

قم بتخفيض منبع الأمواج الدائرية بإعمال المفتاح (30.2) لمجرد ملامسة حافته السفلية سطح الماء (الشكل6).

c) توليد الأمواج الدائرية

يتم اختيار سعة الاهتزاز وتواتره اللذين يرغب بهما باستخدام المفتاحين العقديين (20) و(21) على الترتيب. قم في حال الضرورة بتعديل منبع الأمواج المستقيمة باستخدام المفتاح العقدي (29.1) أو منبع الأمواج الدائرية بالمفتاح العقدي (30.2) حتى تحصل على صورة واضحة للأمواج.

ملحوظة: يمكن مشاهدة الأمواج بسهولة في مجال التواترات المنخفضة للاهتزاز بوجود ستروبوسكوب أو دونه. أما عند التواترات الأعلى للنبضات فينصح باستخدام الستروبوسكوب.



الشكل6

لتوليد نبضات موجية قصيرة short wave packet (single wave)قم بتخفيض سعة الاهتزاز بالمفتاح العقدي (20) واضغط مفتاح توليد النبضات الموجية (19).

4. استخدام الستروبوسكوب

- شغل الستروبوسكوب بالمفتاح (17). تظهر على شاشة المراقبة بعد تشغيله بقليل (بضع ثوان)، صورة لأمواج مستقرة أو متحركة ببطء. استخدم في حال الضرورة المفتاح العقدي (18) لضبط التزامن بدقة بين تواتر منبع الاهتزاز وتواتر الستروبوسكوب.
- بعد إطفاء الستروبوسكوب، ربما تحتاج إلى تدوير قرص الستروبوسكوب بعيداً عن مسار الحزمة الضوئية باستخدام المفتاح العقدي (14).

5. تحديد الطول الموجي

لتحديد البعد الحقيقي للطول الموجي λ خذ في الحسبان معامل التكبير $\beta' \approx 1.65$ الناتج عن إسقاط الأمواج السطحية على شاشة المراقبة. يمكنك تحديد الطول الموجي الحقيقي λ من الطول الموجي المقيس λ' وفقاً للعلاقة $\lambda = \lambda' / \beta'$.

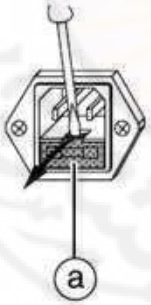
7. تغيير الفيوز (الفاصمة)

- انزع الجزء الداخلي الذي يحتوي الفيوز (a) (الشكل7) (بحامل للمنصهرة الأساسية (b) والمنصهرة الاحتياطية (c))

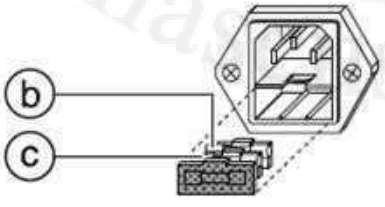
6. تنظيف الأجهزة

قم بتصريف ماء الحوض باستعمال الأنبوب (2). جفف الحوض بعناية وبخاصة أسفل الزجاج (4) وكل الأجزاء الأخرى التي لامست الماء، لمنع تشكل قشرة جافة عليه. تأكد، عند نقل الجهاز، بأن المرآة التي أدخلت فيه من دون تثبيت (10) لن تسقط.

- استبدل الفاصمة الجديدة بعد التأكد من ملاءمتها (c) بالفاصمة التالفة (b).
- استبدل الفاصمة الجديدة بعد التأكد من ملاءمتها (c) بالفاصمة التالفة (b) أدخل الفاصمة الاحتياطية (c) وأعد القطعة (a) إلى مكانها في الجهاز.



الشكل7



الشكل8

التجربة (18)

توليد أمواج دائرية وأمواج مستقيمة

1. هدف التجربة

1. توليد أمواج مائية دائرية بمنبع نقطي للأمواج.
2. توليد أمواج مائية مستقيمة بمنبع أمواج مستقيمة.
3. مراقبة حركة الماء في الموجة ومقارنتها بحركة انتشار الموجة نفسها.
4. قياس الطول الموجي λ للموجة المائية في حالة تواترات مختلفة لمنبع الأمواج f ومِنْ ثَمَّ حساب سرعة انتشار الموجة المائية.
5. قياس سرعة انتشار المجموعة (مجموعة الأمواج) v_g.

2. المبدأ النظري

يمكن، باستخدام الأمواج المائية، إظهار العلاقات التي تسري على أنواع الأمواج كلها بشكل واضح، حيث يمكن في هذه الحالة رؤية الظاهرة بالعين المجردة كما يمكن النظر إليها على أنها تحدث في بعدين. وهكذا من السهل إيضاح وشرح المفاهيم الأساسية لانتشار الأمواج كمفهوم صدر الموجة، واتجاه الانتشار ومجموعة الأمواج، وحمل الطاقة، وسرعة انتشار الموجة، والأمواج المستقيمة أو المستوية والأمواج الدائرية أو الكروية.

يتم توليد الأمواج المائية في حوض للأمواج مملوء بالماء؛ يتكون قاعه من لوح زجاجي. لتوليد الأمواج يتم نقل اهتزازات غشاء (يقع في وحدة التغذية) تتولد نتيجة لتغيير ضغط الهواء، إلى سطح الماء عن طريق ما يسمى منبع الأمواج المائية.

عندما تسقط حزمة ضوئية صادرة عن مصباح نقطي، على حوض الأمواج تسلك قمم الأمواج سلوك عدسات مقربة فتحدث خطوطاً مضيئة على شاشة المشاهدة، بينما تسلك قيعان الأمواج سلوك عدسات مبعدة محدثة الخطوط العاتمة. للحصول على صورة للأمواج المستقرة يستخدم مصباح ستروبوسكوب على التزامن مع منبع الاهتزاز الغشائي.

3. الأدوات والأجهزة

حوض زجاجي للأمواج مع ستروبوسكوب بمحرّك401501، ميقاتية 311031، مسطرة أو شريط قياس 31177، سائل الجلي، كرات من الفلين الأبيض Styrofoam أبعادها من مرتبة الملمتر، أو قصاصات من الورق.

الدائرية أو

4. طريقة العمل

جهز التجربة على النحو المبين في الشكل 2.

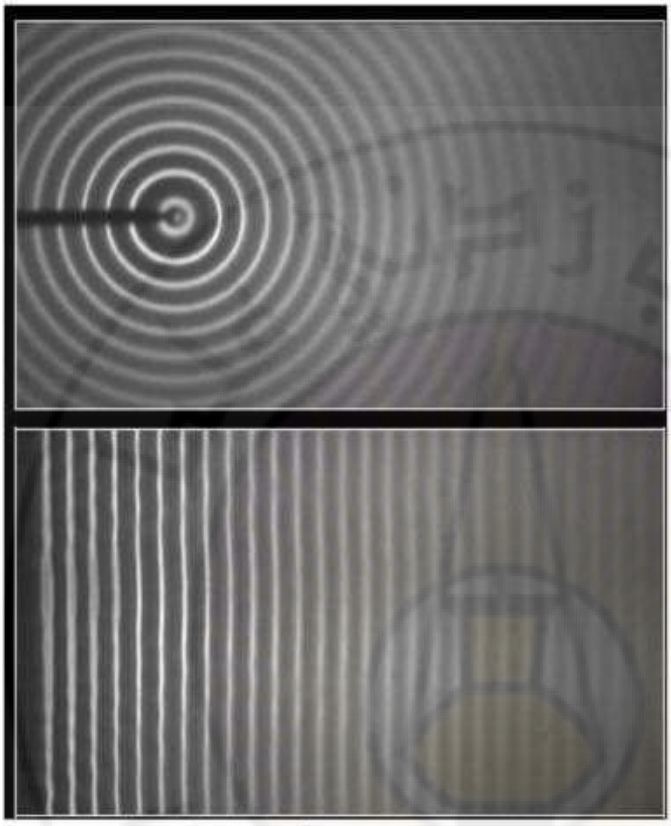
- جهز حوض الأمواج بحيث لا يتعرض للاهتزازات أو الصدمات (اقرأ التعليمات الواردة في هذه التجربة كلها).

a) توليد الأمواج الدائرية

- ركّب منبع الأمواج الدائرية النقطي على النحو المبين في الشكل3.

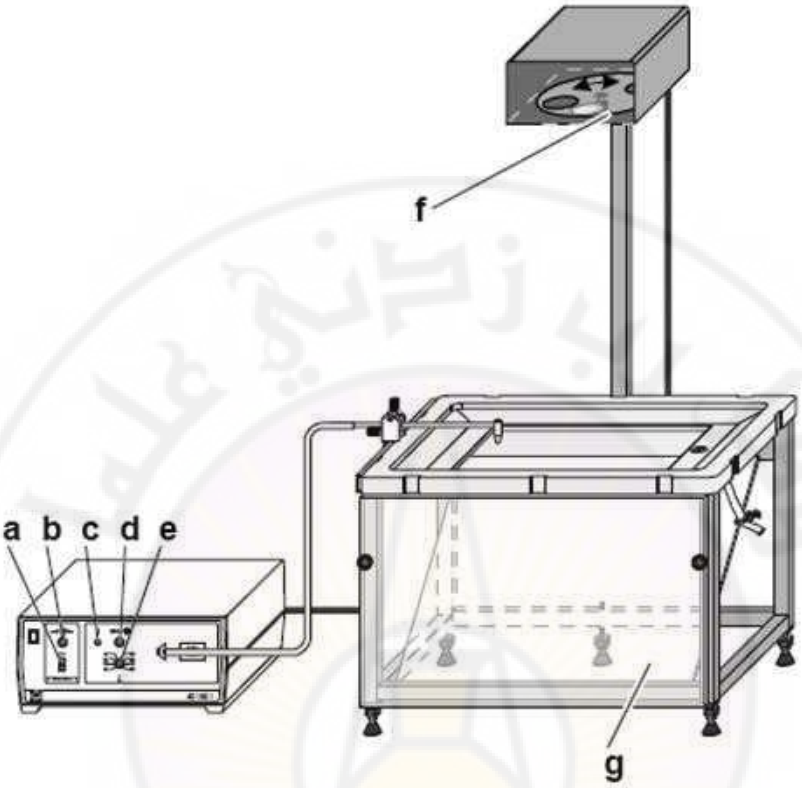
معدات التجربة

a.قاطعة الستروبوسكوب، b. مفتاح تعديل تواتر الستروبوسكوب، c. زر ضغط (لتوليد النبضات)، d. مفتاح للتحكم في سعة منبع الاهتزاز، e. مفتاح للتحكم في تواتر الاهتزاز، f. مفتاح لتدوير قرص الستروبوسكوب يدوياً، g. شاشة مراقبة.

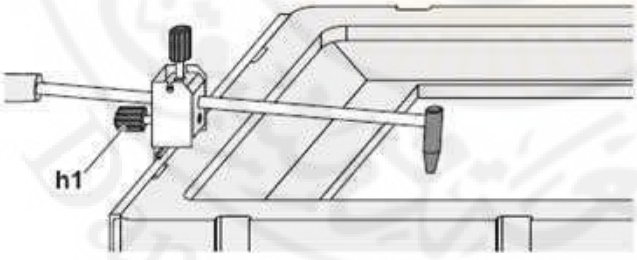


الشكل1. انتشار الأمواج المائية.
في الأعلى أمواج دائرية وفي الأسفل أمواج مستقيمة

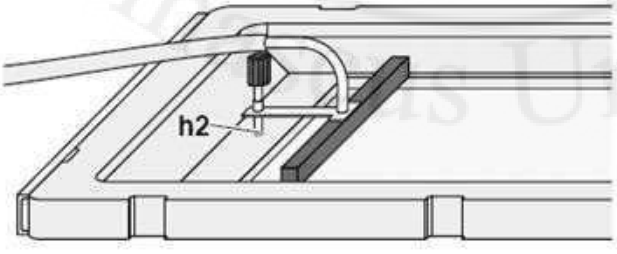
- اجعل تواتر منبع الاهتزاز نحو 20Hz باستخدام المفتاح (e)، وقم بزيادة سعة الاهتزاز تدريجياً باستخدام المفتاح (d) إلى أن تظهر صدور الموجة بوضوح.
- قم، في حال الضرورة، بتدوير قرص الستروبوسكوب خارج مسار الحزمة الضوئية باستخدام المفتاح العقدي *f* بحيث يضاء قاع حوض الأمواج تماماً.
- قم، في حال الضرورة، بتغيير عمق المنبع المغمور في الماء بالبرغي $h1$.



الشكل2. إعداد تجربة توليد الأمواج الدائرية



الشكل3. تركيب منبع نقطي للأمواج الدائرية، $h1$ برغي التحكم بجزء المنبع المغمور في الماء



الشكل4. تركيب منبع الأمواج المستقيمة، $h2$ برغي التحكم بجزء المنبع المغمور في الماء

- لرؤية صورة مستقرة للأمواج، قم بتشغيل الستروبوسكوب بالمفتاح (a). بعد فترة تحمية قصيرة، ربما تحتاج لضبط تواتريْ كل من منبع الأمواج والستروبوسكوب بدقة باستخدام المفتاح (b) حتى تظهر صورة مستقرة للأمواج.
- خذ قيماً مختلفة لتواتر منبع الاهتزاز بين 10Hz و80Hz ولاحظ في كل مرة الخيال المتشكل. قم في كل مرة وفي حال الضرورة بضبط تزامن منبع الاهتزاز والستروبوسكوب بالإضافة إلى السعة.

b) توليد أمواج مستقيمة

- ركّب منبع الأمواج المستقيمة على النحو المبين في الشكل 4.
- اجعل تواتر منبع الاهتزاز 20Hz باستخدام الزر (e)، وقم بزيادة سعة الاهتزاز تدريجياً باستخدام الزر (d) إلى أن تظهر صدور الأمواج بوضوح.
- قم في حال الضرورة بتدوير قرص الستروبوسكوب خارج مسار الحزمة الضوئية باستخدام المفتاح العقدي f بحيث يكون قعر حوض الأمواج مضاء تماماً.
- قم، في حال الضرورة، بتغيير عمق الجزء المغمور في الماء من منبع الأمواج بالمفتاح $h2$.
- للحصول على صورة مستقرة للأمواج، قم بتشغيل الستروبوسكوب بالمفتاح (a). بعد فترة تحمية قصيرة، قم بإجراء تعديلات طفيفة على تواتري منبع الأمواج والستروبوسكوب باستخدام المفتاح (b) إلى أن تظهر صورة مستقرة للأمواج.
- خذ قيماً مختلفة لتواتر منبع الاهتزاز في المجال 10Hz و80Hz ولاحظ في كل مرة الخيال المتشكل.
- قم في كل مرة وفي حال الضرورة بتعديل كل من تزامن الموجة وسعتها.

c) دراسة حركة الماء في موجة معينة ومقارنتها بانتشار الأمواج

- أطفئ الستروبوسكوب، وقم، في حال الضرورة، بتدوير قرصه خارج مسار الحزمة الضوئية.
- قم بذرّ بعض كريّات الفلين الأبيض أو قصاصات الورق في حالة تواترات مختلفة وقم بمراقبة مواقعها وقارن ذلك بانتشار الموجة.

d) قياس الطول الموجي λ لتواترات مختلفة لمنبع الاهتزاز f وحساب سرعة الموجة

- شغّل الستروبوسكوب وقم بتوليد صورة مستقرة للأمواج بمزامنة الجهاز.

- قِسْ البعد بين صدرين للموجة على شاشة المراقبة (g). لا تنس أن تأخذ مقياس التكبير في الحسبان حتى تحدد الطول الموجي الحقيقي.
- غيِّر قيم تواتر منبع الأمواج بين 10Hz و80Hz، وقم في كل مرة بإجراء قياسات لصور الأمواج على النحو المذكور أعلاه.
- احسب سرعة الموجة الموافقة لكل من الطول الموجي المقيس وتواتر المنبع من خلال تطبيق القانون: $v = \lambda \times f$.

e) قياس سرعة انتشار المجموعة (مجموعة الأمواج) v_g في نبضة موجية

- ضع غطاءً منزلقاً على اللوح الزجاجي على بعد 20cm من منبع الموجة كنقطة علام.
- قم، في حال الضرورة، بتدوير قرص الستروبوسكوب خارج مسار الحزمة الضوئية وتدوير مفتاح سعة الاهتزاز (d) إلى أقصى اليسار. تأكد أن منبع الأمواج يلامس سطح الماء فقط على امتداد كامل طوله وأن صدور الأمواج المتولدة ما تزال تظهر بوضوح عند نقطة العلام.
- شغل الميقاتية واضغط الزر (c) لتوليد نبضة موجية في الوقت نفسه.
- قس الزمن t الذي تحتاجه مجموعة الأمواج لتنتقل المسافة s المحددة بنقطة العلام واحسب سرعة الانتشار: $v_g = \frac{s}{t}$.

مثال تجريبي: يبين الشكل1 صورتين مع أمثلة تجريبية.

الجدول1. يبين الطول الموجي λ وسرعة الأمواج المائية v بدلالة تواتر المنبع f

f Hz	λ cm	v cm.s^{-1}
10	2.1	21
20	1.1	22
30	0.8	24
40	0.6	24
50	0.4	20
60	0.4	24
70	0.3	21
80	0.3	24

الجدول2. سرعة انتشار المجموعة

s cm	t s	v_g cm.s^{-1}
20	1	20

5. تحليل النتائج والمناقشة

- تنتشر الأمواج المتولدة عن منبع نقطي شعاعياً وفق صدور أمواج دائرية.
- أما الأمواج المتولدة عن منبع مستقيم للأمواج فتنتشر وفق خطوط مستقيمة وتكون صدور الموجة عمودية على منحى الانتشار.

تتناقص سعة الموجة تدريجياً بفعل التخامد. وتفقد صورة الموجة تباينها مع الابتعاد التدريجي عن منبع الاهتزاز.

لدى انتشار الأمواج لا ينتقل الماء؛ بل يهتز فقط بينما تنتقل طاقة الاهتزاز.

يتناقص الطول الموجي مع تزايد التواتر في مجال التواتر $10\text{-}80Hz$.

تتفق سرعة انتشار المجموعة v_g هنا مع سرعة انتشار الموجة المحسوبة من التواتر والطول الموجي بسبب دقة القياس المتاحة في تجربتنا.

معلومات إضافية

تتعين قوة التماسك بين جزيئات الماء المهتزة، في حالة الأمواج المائية، بوزنها وتوترها السطحي. وتكون سرعة الموجة (أو الطور) v تابعاً للطول الموجي λ:

$$v=\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}+\frac{\sigma}{\rho}\frac{2\pi}{\lambda}}$$

g، تسارع الجاذبية الأرضية، σ التوتر السطحي، ρ الكثافة.

حين يزيد الطول الموجي على القيمة $\lambda=1.7cm$ يسود في العلاقة التناسب الناجم عن الوزن، ويطلق على الأمواج في هذه الحالة اسم **الأمواج التثاقلية**، حيث تزداد سرعة الموجة مع ازدياد الطول الموجي. وحين يقل الطول الموجي عن $\lambda=1.7cm$ تسود في علاقة السرعة مركبة التوتر السطحي وتدعى الأمواج بالرقراقة. وتتناقص سرعة الموجة مع الطول الموجي.

نتيجة التبدد المذكور أعلاه تختلف سرعة الطور v عن سرعة المجموعة (أو الانتشار) v_g. غير أن التبدد في المجال المدروس $(\lambda=1.7cm)$ هو من الضعف بحيث تتساوى سرعتا الطور والمجموعة تقريباً.

بتعبير أدق: لا تطبق المعادلة أعلاه إلّا على الماء العميق إلى حد كاف. أما في حالة الماء الضحل الذي عمقه h فتكون سرعة الموجة التثاقلية:

$$v=\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}\tanh(\frac{2\pi h}{\lambda})}$$

فهرس المصطلحات Index

A	
Acoustic waves	الأمواج الصوتية
Air film	غشاء هوائي
Angular momentum	الاندفاع الزاوي
Attenuation coefficient	معامل التخامد
Axis	لمحور
Axle	محور (العجلة أو الدولاب)
Angular velocity	السرعة الزاوية
B	
Beats: Interference in Time	الخفقان (التداخل خلال الزمن)
Brass is a metallic alloy that is made of copper and zinc	الشَبَه، خليطة معدنية تحضر من النحاس والزنك
Bright and dark bands	عُصابات مضيئة ومظلمة
Bulk modulus	معامل المرونة الجرمي، الحجمي
C	
Capacitance	السعة
Capacitor plates	صفائح المكثفة
capacitors (Parallel plates)	مكثفات متوازية الصفيحتين أو اللبوسين
Coupling	الترابط (الاقتران)
Coupling process	عملية الترابط (الاقتران)
coupling (coefficient of)	معامل الترابط
Coupling (loose)	الترابط الضعيف
Coupling (tight)	الترابط الشديد
Coupling with weak springs	الترابط بنوابض ضعيفة
Coupling Force	قوة الترابط
Coupled loops	حلقتان(عروتان) مترابطتان
'frequency band pass' coupling	الترابط بعصابة التواتر المسموحة
Mass or Inductance Coupling	الترابط بالكتلة أو التحريضية
'critical coefficient of coupling	معامل الترابط الحرج
Coupled Oscillations	الاهتزازات المترابطة
Coupled system	جملة مترابطة
Coupled pendulums	النواسات المترابطة
Inductively coupled	مترابط تحريضياً
Coupled vibrations	ذبذبات مترابطة
Coupled by a spring	مترابطة بنابض
LC circuits coupled by a common capacitance	دارات كهربائية مهتزة مترابطة بمكثفة مشتركة

Coupling capacitor	مكثفة الترابط
Inductive coupling	الترابط التحريضي
Capacitance Coupled Oscillators	هزازات مترابطة بالسعة
CCD (charge-coupled device) array	صفيف للأدوات المقترنة بالشحنة
Cross-sectional area	مساحة المقطع
Curved surface of the lens	السطح المنحني لعدسة
D	
Damped simple harmonic oscillations	اهتزازات توافقية بسيطة متخامدة
Critical damping	التخامد الحرج
Heavily damped	متخامد بشدة
Heavy Damping	التخامد الشديد
Damped mechanical circuit	دارة ميكانيكية متخامدة
Damping constant	ثابت التخامد
The logarithmic decrement	التخامد اللغارتمي
Damped Oscillations	اهتزازات متخامدة
Dampers	مخمّدات
Damping coefficient	عامل التخامد
Damped oscillator	هزاز متخامد
Undamped oscillator	هزاز غير متخامد
Critically damped systems	جمل متخامدة تخامداً حرجاً
Overdamped systems	جمل متخامدة تخامداً شديداً
Damping force	قوة التخامد
Damped simple harmonic motion	حركة توافقية بسيطة متخامدة
Under damped oscillator	هزاز خفيف التخامد
Deformation of an object	تشوه جسم
Direction of propagation	اتجاه الانتشار
Doppler effect	مفعول (أثر) دوبلر
E	
Envelope of the oscillatory curve	غلاف منحني الاهتزاز
F	
Flat plate, flat glass surface	صفيحة مستوية، سطح زجاجي مستوي
Forced Oscillations	الاهتزازات القسرية
Forced electrical oscillator	الهزاز القسري الكهربائي،
Forced mechanical oscillator	الهزاز الميكانيكي القسري
Forced motion amplitude	سعة(مطال) الحركة القسرية
Fringes ,Circular fringes	أهداب، أهداب دائرية
G	
Gravitational force	القوة الثقالية (قوة الثقالة)
Gyroscope	الجيروسكوب
Motion of Gyroscopes and Tops	حركة الجيروسكوبات والدوامات (الخذاريف)

H	
Hooke's Law	قانون هوك
I	
Index of refraction	قرينة الانكسار
Inductance	تحريضية
variable mutual inductance	تحريضية متبادلة متغيرة
Induction , self- induction, electromagnetic induction	التحريض، تحريض - ذاتي، تحريض كهرطيسي
Induction coil	ملف(وشيعة) تحريض
L	
Longitudinal wave	موجة طولانية
M	
Maximum displacement	الإزاحة العظمى
Modulus of Decay	عامل التفكك (الاضمحلال)
Moment of inertia	عزم العطالة
N	
Nodes, Antinodes	العقد، البطون
Natural frequency (normal)	التواتر الطبيعي ، النظامي
Normal modes	الأنماط النظامية
superposition of normal modes	انضمام الأنماط النظامية
Newton's Rings	حلقات نيوتن
Nutation	حركة الترنح (جيروسكوب)
O	
Opposite directions	اتجاهان متعاكسان
Optical lenses	عدسات ضوئية
Oscillations	الاهتزازات
Oscillations (Large amplitude)	اهتزازات كبيرة السعة
P	
Phase change	تغير الطور
Plano-convex lens	عدسة مستوية – محدبة
Pattern of light and dark rings	نموذج حلقات مضيئة ومظلمة
Pivot point	نقطة ارتكازمحورية
Precessional motion of a top spinning about its symmetry axis	حركة مبادرة لدوامة تدور حول محورها التناظري
Precession frequency	تواتر (تردد) المبادرة
Progressive motion	حركة تقدمية
Proportionality constant	ثابت التناسب
Q	
Quality factor	عامل الجودة
Q of an oscillator	عامل جودة هزاز
R	

Radii of the bright and dark bands	أنصاف أقطار العصابات المضيئة والمظلمة
Radius of curvature	نصف قطر الانحناء
Rays	أشعة
Relaxation Time	زمن الاسترخاء
Resistance	مقاومة
Resonance	تجاوب (رنين)
Resonance frequency	تواتر التجاوب
Restoring force	قوة الإرجاع
S	
Shear modulus: transverse elasticity modulus	عامل القص، عامل المرونة العرضاني
Shear strain	انفعال القص
shearing stress or a tensile stress	إجهاد قصّي أو إجهاد شدّي
Shock waves	أمواج صادمة
Sound waves	أمواج صوتية
Spacecraft	مركبة فضائية
Standing waves	أمواج مستقرة
Stiffness	القساوة ، اليباسة
Strong coupling	اقتران شديد
stiffness of the spring	قساوة النابض
Stiff springs	نوابض قاسية
String	وتر، خيط
Spring constant	ثابت النابض
Strain , fractional length change	الانفعال: نسبة التغير في الطول
Stress: Force per unit cross-sectional area.	الإجهاد: القوة في واحدة المقطع
Normal stress	الإجهاد الناظمي
Superposition	الانضمام، التراكب
Superposition principle	مبدأ الانضمام
Tension	التوتر، الشدّ
Transverse sinusoidal waves	أمواج جيبية عرضانية
Tensile or compressive forces	قوى شادة أو ضاغطة
Transverse elasticity modulus,	عامل المرونة العرضاني
Transverse waves	أمواج عرضانية
Torsion balance	ميزان الفتل
Torsional pendulum	نواس الفتل
Torsion constant	ثابت الفتل
Top spinning about its axis of symmetry	دوامة تدور حول محور تناظرها
Transmitter	مرسل، مصدر
Torque	عزم قوة

V	
Velocity	السرعة
Vibrations	اهتزازات، ذبذبات
W	
Wavelength	طول موجي
Young's modulus	معامل يانغ

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

المراجع

[1] أملية الفيزياء العملية 4، منشورات مديرية الكتب الجامعية

[2] الاهتزازات والأمواج ، د. الطرابيشي 2009-2008، منشورات جامعة دمشق.

[3] Alvin Halpern, E. E. (1998). Beginning Physics II: Waves, Electromagnetism, Optics and Modern Physics.

[4] Cataluge of expermental Physics . (2017). Berlin: Lybold.

[5] Cataluge of Physics_EN. (2015). Berlin: 3B Scientific.

[6] Georg Joos, I. M. (2013). Theoretical Physics. NewYork: Dover.

[7] Goldstein, P. a. (2000). Classical mechanics. San Fransisco.

[8] Manual of PHYWE (School and University). (2015). Berlin: PHYWE.

[9] Spiegel, M. R. (1967). Theory And Problems Of Theoretical Mechanics.

[10] The Feynman Lectures on Physics. California: California Institute of Technology.

[11] The Physics of Vibrations and Waves, 5th Edition, H.J. Pain, Wiley 1999.

[12]Physics for Scientists and Engineers, 9th edition, 2013, SERWAY & JEWETT, edited by Brooks/Cole.

[13] Physics, 2nd edition, 2010, Alan Giambattista, Betty Richardson, Bob Richardson,

اللجنة العلمية

الأستاذ الدكتور محمد قعقع

أستاذ الفيزياء في قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة دمشق

الدكتورة عناية زين

أستاذ مساعد في قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة دمشق

الدكتور أحمد اليحيى

أستاذ مساعد في قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة دمشق

التدقيق اللغوي

الأستاذ الدكتور محمد قاسم

أستاذ اللغة العربية في قسم اللغة العربية – كلية الآداب – جامعة دمشق

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University