



الإمارات العربية المتحدة
وزارة التربية والتعليم



2022-2023

الفيزياء

نسخة الإمارات العربية المتحدة



الصف
12
متقدم

Mc
Graw
Hill

McGraw-Hill Education

الفيزياء

نسخة الإمارات العربية المتحدة

للسف 12 المتقدّم

مجلد 3



FM. Front Matter, from University Physics with Modern Physics, 2e by Bauer and Westfall ©2014

9. Electromagnetic Induction, Chapter 29, from University Physics with Modern Physics, 2e by Bauer and Westfall ©2014

10. Alternating Current Circuits, Chapter 30, from University Physics with Modern Physics, 2e by Bauer and Westfall ©2014

11. Electromagnetic Waves, Chapter 31, from University Physics with Modern Physics, 2e by Bauer and Westfall ©2014

EM, End Matter, from University Physics with Modern Physics, 2e by Bauer and Westfall ©2014

صورة الغلاف: Russ Widstrand/WidStock/Alamy

mheducation.com/prek-12



جميع الحقوق محفوظة © للعام 2020 لصالح مؤسسة McGraw-Hill Education

جميع الحقوق محفوظة. لا يجوز إعادة إنتاج أي جزء من هذا المنشور أو توزيعه في أي صورة أو بأي وسيلة كانت أو تخزينه في قاعدة بيانات أو نظام استرداد من دون موافقة خطية مسبقة من McGraw-Hill Education. بما في ذلك، على سبيل المثال لا الحصر، التخزين على الشبكة أو الإرسال عبرها أو البث لأغراض التعليم عن بُعد.

الحقوق الحصرية للتصنيع والتصدير عائدة لمؤسسة McGraw-Hill Education. لا يمكن إعادة تصدير هذا الكتاب من البلد الذي باعت له McGraw-Hill Education. هذه النسخة الإقليمية غير متاحة خارج أوروبا والشرق الأوسط وإفريقيا.

النسخة الإلكترونية

طُبِعَ في دولة الإمارات العربية المتحدة.

رقم النشر الدولي: 978-1-44-701609-0 (نسخة الطالب)
MHID: 1-44-701609-2 (نسخة الطالب)

رقم النشر الدولي: 978-1-39-890175-9 (نسخة الطالب)
MHID: 1-39-890175-X (نسخة الطالب)

المحتويات الموجزة

- 1 القوى الكهروستاتيكية
- 2 المجالات الكهربائية وقانون جاوس
- 3 الجهد الكهربائي
- 4 المكثفات
- 5 التيار والمقاومة
- 6 دوائر التيار المستمر
- 7 المغناطيسية
- 8 المجالات المغناطيسية للشحنات المتحركة
- 9 الحث الكهرومغناطيسي
- 10 دوائر التيار المتردد
- 11 الموجات الكهرومغناطيسية

الملحق A: تمهيد الرياضيات
الملحق B: خواص العناصر
إجابات أسئلة ومسائل مختارة

يتم تعريف المحتوى على تطبيق التعلم الذكي



نبذة عن المؤلفين

فولف جايج باور وُلد في ألمانيا وحصل على الدكتوراه في الفيزياء النووية النظرية من جامعة غيسن عام 1987. بعد حصوله على منحة لمرحلة ما بعد الدكتوراه في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، انضم إلى كلية ولاية جامعة ميشيغان عام 1988. كما عمل في الوقت ذاته في المختبر الوطني للمسرّع الدوراني فائق التوصيل (NSCL). وقد تضمنت أبحاثه العمل على مجموعة كبيرة من الموضوعات في الفيزياء النظرية والفيزياء الحاسوبية مثل درجة الحرارة العالية فائقة التوصيل وانفجارات المستعر الأعظم، لكنه أولى اهتمامًا خاصًا لموضوع التصادمات النووية النسبوية. ولعل أكثر ما اشتهر به هو عمله المتعلق بمراحل انتقال المادة النووية في تصادمات الأيونات الثقيلة. في السنوات الأخيرة، ركّز الدكتور باور في أبحاثه ومحاضراته على القضايا المتعلقة بالطاقة، بما في ذلك موارد الوقود الأحفوري وطرق الاستخدام الفعال للطاقة، وخاصةً موارد الطاقة البديلة والطاقة التي لا تزيد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وفي عام 2009، أسس معهد البحوث السيبرانية المساعدة وكان أول مدير له حتى عام 2013. وفي الوقت الحالي، يعمل رئيسًا لقسم الفيزياء والفلك ويشغل منصب أستاذ متميز في جامعة ميشيغان.



غراي د. ويستفال بدأ حياته المهنية في مركز الدراسات النووية في جامعة تكساس بمدينة أوستن حيث حصل على درجة الدكتوراه في الفيزياء النووية التجريبية عام 1975. بعد ذلك، انتقل إلى مختبر لورانس بيركلي الوطني (LBNL) في مدينة بيركلي بولاية كاليفورنيا لإكمال عمله في مرحلة ما بعد الدكتوراه في مجال فيزياء الطاقة النووية العالية. وقد ظل بعدها يعمل عالمًا في المختبر. في أثناء عمله في مختبر لورانس بيركلي الوطني، اشتهر الدكتور ويستفال على المستوى الدولي، وذلك لعمله المتعلق بنموذج كرة اللهب النووية واستخدام التجزئة لإنتاج نواة غير مستقرة. في عام 1981، انضم الدكتور ويستفال إلى المختبر الوطني للمسرّع الدوراني فائق التوصيل (NSCL) بجامعة ميشيغان (MSU) كأستاذ باحث؛ حيث صمم كاشف جامعة ميشيغان MSU 4p وأنشأه وأداره. أنتجت أبحاثه التي استخدم فيها كاشف جامعة ميشيغان 4p الكثير من المعلومات المتعلقة باستجابة المادة النووية عند انضغاطها خلال انهيار المستعر الأعظم. وفي عام 1987، انضم د. ويستفال إلى قسم الفيزياء والفلك بجامعة ميشيغان، لكنه لم يتوقف عن متابعة أبحاثه في المختبر الوطني للمسرّع الدوراني فائق التوصيل (NSCL). أما في عام 1994، فانضم د. ويستفال إلى مجموعة تعاون المتتبع اللولبي في مصادم الأيونات الثقيلة بسرعات النسبية (STAR Collaboration) في مختبر بروكهافن الوطني في لونج آيلاند بنيويورك. وفي عام 2003، عُيّن أستاذًا متميزًا في جامعة ميشيغان.

الشراكة بين ويستفال وباور تعاون الدكتوران باور وويستفال في العمل على أبحاث الفيزياء النووية وأبحاث تدريس الفيزياء لمدة تزيد على عقدين من الزمان. بدأت هذه الشراكة عام 1998، حينها كان كلا المؤلفين يلقي خطابًا في مؤتمر واحد وقررا أن يذهبا إلى التزلج معًا بعد انتهائهما. في هذه المناسبة، عيّن ويستفال د. باور لينضم إلى جامعة ميشيغان (وذلك ببعض التهديد بدفعه من الزلاجة إذا رفض). وقد حصلًا على تمويل من مؤسسة العلوم الوطنية لتطوير أساليب جديدة للتدريس وأنشطة المختبر، كما أصدرًا أقراص مضغوطة عن الفيزياء لطلابهما في مدرسة ليمان بريغز وشاركوا في تأليف كتاب مدرسي عن القرص المضغوط يُسمى *cliXX Physik*. في عام 1992، كانا من أوائل الداعمين لاستخدام الإنترنت في التدريس والتعلم من خلال تطوير الإصدار الأول من نظام الواجب المنزلي عبر الإنترنت. وفي السنوات التالية، كان لهما دور فعال في إنشاء شبكة التعلم عبر الإنترنت بالاشتراك مع شبكة التعليم العالمية (CAPA). ويستخدم هذه الشبكة الآن ما يزيد على 70 جامعة وكلية في الولايات المتحدة وجميع أنحاء العالم. وبدايةً من عام 2008، شارك باور وويستفال مع فريق من المدرسين والمهندسين والفيزيائيين ممن يبحثون في استخدام التعلم بمساعدة الأقران في تدريس منهج الفيزياء التمهيدي. تلقى هذا المشروع تمويلًا من مؤسسة العلوم الوطنية وبرنامج توسيع المواهب في العلوم والتقنية والهندسة والرياضيات، ويتضمن هذا الكتاب المدرسي أفضل أساليب المشروع وممارساته.

إهداء إننا نهدي هذا الكتاب إلى عائلاتنا. فلولا صبرهم وتشجيعهم ودعمهم، ما تمكنا من إتمامه.

رسالة من المؤلفين

يسعدنا أن نقدم لكم الإصدار الثاني من كتاب الفيزياء، إنَّ الفيزياء من العلوم المزدهرة والحيوية، فهي تطرح تحديات فكرية والعديد من مسائل البحث بشأن موضوعات مختلفة، بدايةً من أكبر المجرات وحتى أصغر الجسيمات دون الذرية. لقد تمكَّن علماء الفيزياء من تزويدنا بالفهم وتوضيح الاتساق والنظام الذي يكمن في عالمنا، كما أنهم وضحو أنَّ العالم يمكن التوقع به، وسيستكملون هذا المسعى الذي سيأخذنا إلى المستقبل المثير.

لكننا عندما نطالع معظم الكتب التمهيدية الحالية في الفيزياء، نجد أنَّ كلاً منها يسرد قصة مختلفة؛ حيث تُقدِّم الفيزياء بصفتها علماً مكتئلاً حدثت التطورات المهمة فيه إما في عصر نيوتن أو في بداية القرن العشرين. أمَّا الفيزياء "المعاصرة"، فلا نطالعها إلا في نهاية الكتب القياسية، وغالباً نجد أنَّ عرضها يقتصر على تناول الاكتشافات التي ظهرت خلال سبعينيات القرن العشرين.

إنَّ دافعنا في كتابة هذا الكتاب هو تغيير ذلك المفهوم من خلال تضمين الفيزياء المعاصرة المثيرة على مدار الكتاب. فالفيزياء من العلوم التي تنسم بالتغير بشكل مدهش؛ حيث يحفل دائماً بالاكتشافات والتطبيقات الفارقة التي تغير من حياتنا. ولمساعدة الطلاب على إدراك ذلك، يجب أن نخبرهم قصة الفيزياء بالكامل وذلك من خلال تضمين الفيزياء المعاصرة في هذا المقرر الذي يستند إلى حساب التفاضل والتكامل. وقد عملنا على تحقيق ذلك بدايةً من الفصل الدراسي الأول. حيث تتوفر العديد من الفرص لاستكشاف الفيزياء المعاصرة من خلال تضمين النتائج الحديثة من علم الحركة غير الخطية ونظرية الفوضى والتعقيد وأبحاث الفيزياء عالية الطاقة في هذا المنهج التمهيدي، ولأننا نجري العديد من الأبحاث في هذه المجالات، فإننا نعلم أنَّه يمكن للطلاب فهم أساسيات العديد من النتائج الحديثة في هذه المجالات:

فالنتائج الحديثة في الطاقة المتجددة والبيئة والهندسة والطب والتكنولوجيا توضح الإثارة الفكرية التي تنسم بها الفيزياء، مما يشجع الطلاب وينعش الأجواء في الصفوف الدراسية فيسهِّل ذلك على المعلم مهمته ويجعلها مهمة ممتعة، وبصفة خاصة، فإننا نعتقد أنَّ مناقشة موضوع عام مثل موضوع الطاقة سيكون فرصة جيدة لجذب انتباه الطلاب واهتمامهم. فالمفاهيم المتعلقة بموارد الطاقة (الوقود الأحفوري والطاقة المتجددة والطاقة النووية وغير ذلك) وكذلك كفاءة الطاقة وتخزين الطاقة وموارد الطاقة البديلة والتأثيرات البيئية التي تترتب على اختيارات أنواع إمدادات الطاقة (مثل الاحترار العالمي وتحمُّض المحيطات)، من المفاهيم التي يسهل على الطلاب فهمها في مستوى المنهج التمهيدي في الفيزياء. لقد ائضح لنا أن مناقشة موضوع الطاقة هو أكثر ما يثير اهتمام الطلاب، لذا فقد تناولنا جوانب مختلفة لموضوع الطاقة على مدار هذا الكتاب.

وبالإضافة إلى التعرف على عالم الفيزياء المدهش، سيستفيد الطلاب استفادةً كبيرة، حيث سيكتسبون القدرة على **حل المسائل والتفكير المنطقي في مختلف المواقف**. تقوم الفيزياء على مجموعة من الأفكار الأساسية التي تُعد أساساً للعلوم جميعها. ونحن نعلم ذلك ولذا فإننا نقدم في هذا الكتاب طريقة مفيدة لحل المسائل وهي تُستخدم على مدار الكتاب بأكمله. تتضمن هذه الطريقة صيغة متعددة الخطوات كنا قد طورناها مع طلابنا في الصفوف الدراسية؛ لكنَّ إتيان المفاهيم لا يقتصر على ذلك فحسب، بل يتضمن تطبيقها كذلك. ولهذا السبب، طلبنا من عشرات المساهمين في الكتاب ممن يعملون في جامعات البلد البارزة، أن يبذلوا أفضل ما في وسعهم في التمارين الموجودة في نهاية كل وحدة. وقد أضفنا إلى هذا الإصدار حوالي 400 تمرين بمعطيات متعددة، بحيث تسمح للطلاب بتناول المسألة الواحدة من أكثر من منظور مختلف.

في عام 2012، نشر مجلس البحث الوطني إطاراً لتعليم العلوم من مرحلة رياض الأطفال إلى الثانوية. ويتناول هذا الإطار التطبيقات الأساسية في العلوم والهندسة والمفاهيم التي توجد تطبيقاتها في المجالات والأفكار الأساسية في مجالات التخصصات الأربعة (في الفيزياء، توجد المادة وتفاعلاتها والحركة والاستقرار والطاقة والموجات وتطبيقاتها في نقل المعلومات). وقد صمما الإصدار الثاني من هذا الكتاب لربط دراسة الطلاب للفيزياء بهذا الإطار. وقدّمنا جزء التأكيد من مراجعة المفاهيم وأسئلة للاختبار الذاتي في كل وحدة.

مع وضع كل ذلك في الاعتبار، إضافةً إلى رغبتنا في كتابة كتاب شيق، فقد صمما ما نأمل أن يكون أداةً لكي يستخدم الطلاب مخيلتهم وإعدادهم بشكل أفضل لتلقي دورات في المستقبل في المجالات التي يختارونها (وبالطبع فإننا نأمل أن يتخصص بعض الطلاب في دراسة الفيزياء). إنَّ التعقيبات التي قدّمها لنا ما يزيد على 400 شخص، بما فيهم مجلس من المستشارين والعديد من المساهمين والمراجعين والمشاركين في مجموعة التركيز وكذلك الاختبار الميداني لأفكارنا مع 6000 طالب تقريباً من الطلاب الذين يدرسون منهج الفيزياء التمهيدي في جامعة ميشيغان، قد ساعدنا مساعدةً كبيرة في إنجاز هذا المشروع الضخم، فخالص الشكر لكم جميعاً!

— فولف جانج باور وغراي د. ويستفال

المحتويات

كيفية استخدام هذا الكتاب XI
شكر وتقدير XV



4 المكثفات 87

- 4.1 السعة 88
- 4.2 الدوائر 90
- 4.3 المكثف متوازي اللوحين والأنواع الأخرى من المكثفات 90
- 4.4 المكثفات في الدوائر 94
- 4.5 الطاقة المخزنة في المكثفات 97
- 4.6 المكثفات والعوازل الكهربائية 101
- 4.7 منظر مجهرى للعوازل الكهربائية 105
- ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 108
- أسئلة الاختيار من متعدد/أسئلة مفاهيمية/تمارين/تمارين بمعطيات متعددة 109



5 التيار والمقاومة 115

- 5.1 التيار الكهربائي 116
- 5.2 كثافة التيار 119
- 5.3 المقاومة النوعية والمقاومة 121
- 5.4 القوة الدافعة الكهربائية وقانون أوم 125
- 5.5 توصيل المقاومات على التوالي 127
- 5.6 توصيل المقاومات على التوازي 130
- 5.7 الطاقة والقدرة في الدوائر الكهربائية 134
- 5.8 الثنائي أحادي الاتجاه في الدوائر الكهربائية (ديود) 137
- ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 138
- أسئلة الاختيار من متعدد/أسئلة مفاهيمية/تمارين/تمارين بمعطيات متعددة 139



6 دوائر التيار المستمر 145

- 6.1 قانونا كيرشوف 146
- 6.2 دوائر كهربائية أحادية الحلقة 148
- 6.3 دوائر متعددة الحلقات 150
- 6.4 أجهزة الأميتر وأجهزة الفولتميتر 153
- 6.5 دائرة كهربائية تحوي مقاوما ومكثفا (RC) 155
- ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 162
- أسئلة الاختيار من متعدد/أسئلة مفاهيمية/تمارين/تمارين بمعطيات متعددة 163



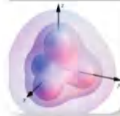
1 القوى الكهروستاتيكية 1

- 1.1 الكهرومغناطيسية 2
- 1.2 الشحنة الكهربائية 3
- 1.3 العوازل والموصلات وأشباه الموصلات والموصلات الفائقة التوصيل 6
- 1.4 الشحن الكهروستاتيكي 7
- 1.5 القوة الكهروستاتيكية — قانون كولوم 10
- 1.6 قانون كولوم وقانون نيوتن في الجذب 19
- ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 20
- أسئلة الاختيار من متعدد/أسئلة مفاهيمية/تمارين/تمارين بمعطيات متعددة 21



2 المجالات الكهربائية وقانون جاوس 26

- 2.1 تعريف المجال الكهربائي 27
- 2.2 خطوط المجال 27
- 2.3 المجال الكهربائي الناتج عن الشحنات النقطية 30
- 2.4 المجال الكهربائي الناتج عن ثنائي قطب 32
- 2.5 التوزيعات العامة للشحنة 34
- 2.6 القوة الناتجة عن مجال كهربائي 37
- 2.7 التدفق الكهربائي 42
- 2.8 قانون جاوس 43
- 2.9 ثنائيات خاصة 46
- ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 52
- أسئلة الاختيار من متعدد/أسئلة مفاهيمية/تمارين/تمارين بمعطيات متعددة 53



3 الجهد الكهربائي 59

- 3.1 طاقة الوضع الكهربائية 60
- 3.2 تعريف الجهد الكهربائي 62
- 3.3 أسطح وخطوط تساوي الجهد 67
- 3.4 الجهد الكهربائي للتوزيعات المختلفة للشحنة 69
- 3.5 إيجاد المجال الكهربائي من الجهد الكهربائي 77
- 3.6 طاقة الوضع الكهربائية لنظام من الشحنات النقطية 79
- ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 80
- أسئلة الاختيار من متعدد/أسئلة مفاهيمية/تمارين/تمارين بمعطيات متعددة 81



10 دوائر التيار المتردد 257

- 10.1 دوائر المحثات والمكثفات 258
- 10.2 تحليل ذبذبات دائرة المحث والمكثف 260
- 10.3 الذبذبات المتخامدة في دائرة المحث والمقاوم والمكثف 262
- 10.4 عمل دوائر التيار المتردد 264
- 10.5 دائرة محث ومقاوم ومكثف موصلة على التوالي 267
- 10.6 الطاقة والقدرة في دوائر التيار المتردد 273
- 10.7 المحولات 279
- 10.8 المقومات 281
- ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 283
- أسئلة الاختيار من متعدد/أسئلة مفاهيمية/تمارين/تمارين بمعطيات متعددة 284

11 الموجات الكهرومغناطيسية 289

- 11.1 قانون ماكسويل في الحث الكهرومغناطيسي 290
- 11.2 الحلول الموجية لمعادلات ماكسويل 293
- 11.3 الطيف الكهرومغناطيسي 297
- 11.4 متجه بوينتنج ونقل الطاقة 301
- 11.5 ضغط الإشعاع 303
- 11.6 الاستقطاب 308
- 11.7 اشتقاق المعادلة الموجية 314
- ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 315
- أسئلة الاختيار من متعدد/أسئلة مفاهيمية/تمارين/تمارين بمعطيات متعددة 316

الملحق A: تمهيد الرياضيات A-1

الملحق B: خواص العناصر A-9

إجابات أسئلة ومسائل مختارة SA-1



7 المغناطيسية 169

- 7.1 مغناطيس دائم 170
- 7.2 القوة المغناطيسية 173
- 7.3 حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي 175
- 7.4 القوة المغناطيسية المؤثرة في سلك يمر فيه تيار كهربائي مستمر 182
- 7.5 العزم المؤثر في حلقة يمر بها تيار 184
- 7.6 عزم ثنائي القطب المغناطيسي 185
- 7.7 تأثير هول 187
- ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 188
- أسئلة الاختيار من متعدد/أسئلة مفاهيمية/تمارين/تمارين بمعطيات متعددة 189



8 المجالات المغناطيسية للشحنات المتحركة 195

- 8.1 قانون بيو سافار 196
- 8.2 المجالات المغناطيسية الناتجة عن مرور التيار 197
- 8.3 قانون أمبير 206
- 8.4 المجالات المغناطيسية الخاصة بالملفات اللولبية والحلقية 208
- 8.5 الذرات كمغناطيسات 212
- 8.6 الخواص المغناطيسية للمادة 214
- 8.7 المغناطيسية والموصلية الفائقة 217
- ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 218
- أسئلة الاختيار من متعدد/أسئلة مفاهيمية/تمارين/تمارين بمعطيات متعددة 219



9 الحث الكهرومغناطيسي 225

- 9.1 تجارب فاراداي 226
- 9.2 قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي 227
- 9.3 قانون لينز 232
- 9.4 المولدات والمحركات 239
- 9.5 المجال الكهربائي المستحث 240
- 9.6 الحث الخاص بالملف اللولبي 241
- 9.7 الحث الذاتي والحث المتبادل 242
- 9.8 دوائر المقاومة والحث 244
- 9.9 الطاقة وكثافة الطاقة للمجال المغناطيسي 247
- 9.10 تطبيقات على تكنولوجيا المعلومات 248
- ما تعلمناه/دليل المذاكرة للاختبار 250
- أسئلة الاختيار من متعدد/أسئلة مفاهيمية/تمارين/تمارين بمعطيات متعددة 251

كيفية استخدام هذا الكتاب

مهارات حل المسائل: تعلم التفكير مثل العلماء

ربما تكون أهم المهارات التي يمكن للطلاب أن يتعلموها من منهج الفيزياء هي القدرة على حل المسائل والتفكير الناقد في أي موقف. تقوم الفيزياء على أساس مجموعة من الأفكار الأساسية التي يمكن تطبيقها على العديد من المواقف والمشكلات. في هذا الكتاب الذي ألفه باور وويستفال، يركز المؤلفان على حل المسائل ويقدمان لها طريقة كانا قد اختبراها في الصفوف الدراسية قبل استخدامها في هذا الكتاب. وهذه الطريقة تتمثل في صيغة متعددة الخطوات.

طريقة حل المسائل

المسائل المحلولة

إن المسائل المحلولة الرقمية عبارة عن مسائل محلولة بالكامل، ويتبع كل منها طريقة الخطوات السبع الموضحة في القسم 1.5. تبدأ كل مسألة محلولة منها بعبارة المسألة ويليهما الحل الكامل، كما تُستخدم طريقة الخطوات السبع في الربط

الجسيمات الموجودة في المسرع

مسألة محلولة 13.2

افترض أن لديك الإلكترون وجسيم ألفا (نواة ذرة هيليوم) يتحركان عبر جزء من أنبوب شعاعي داخل مسرع الجسيمات. وتتحرك الجسيمات في الاتجاه نفسه، تبلغ سرعة الإلكترون $0.830c$ وسرعة جسيم ألفا $0.750c$. ولقد فاس هاتين سرعتين ملاحظ ثابت في المختبر.

المسألة

ما سرعة جسيم ألفا كما لوحظت من الإلكترون، بدلالة سرعة الضوء؟

الحل

فكر بتخطي الإلكترون سرعة جسيم ألفا، نظراً لأنه أسرع. وفقاً لقياس الملاحظ الثابت في المختبر، يمكن أن يميل المرء إلى بناء استدلالات من النوع $V - V$ ، ولكن مع توفر تحويل السرعة المتجهة النسبية، أصبح من السهل كثيراً حل هذه المسألة بهذه الطريقة. افترض أن جميع السرعات المتجهة المعروفة تقع في اتجاه x الموجب، كل ما علينا القيام به هو أن نكون حذرين تجاه السرعات التي نحددتها بوصفها u و u' و u'' . يمكننا بعد ذلك استخدام المعادلة 13.17 أو المعادلة 13.18 لإيجاد الإجابة.

ارسم الشكل 13.13 عبارة عن رسم لإلكترون يعبر جسيم ألفا.

ابحث لدينا مناماً إسناد، منام أصلي F ينطلق أصل على الأرض ومنام F' ينطلق أصل على الإلكترون. يتحركان بسرعة متجهة ثابتة V بالنسبة إلى المختبر. إن إيجاد السرعة المتجهة u'_x لجسيم ألفا في منام الإلكترون يتضمن التحويل النسبي للسرعات المتجهة، حيث إن السرعة المتجهة u_x لجسيم ألفا في منام المختبر معلومة بالفعل. يمكننا بعد ذلك استخدام المعادلة 13.17 لتحقيق هدفنا في إيجاد

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{vu_x}{c^2}}$$

بشكل لا يوجد الكثير لتبسيطه في هذه الحالة. وتُغزل معظم العمل هنا في تحديد أي كمية يتم قياسها في أي منام وتحديد السرعة المتجهة النسبية الصحيحة للمناملات.

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{vu_x}{c^2}} = \frac{0.750c - 0.830c}{1 - \frac{(0.830c)(0.750c)}{c^2}} = -0.2119205c.$$

قرب سنقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$u'_x = -0.212c.$$

تحقق ثانية العلامة السالبة للسرعة المتجهة لجسيم ألفا كما يراها الإلكترون منطقتي لأن جسيم ألفا سيبدو وكأنه يقترب من الإلكترون في اتجاه x السالب، إذا حسبنا السرعة المتجهة النسبية بين الإلكترون وجسيم ألفا بشكل غير نسبي، فنحصل على

$$V_{rel} = V_{alpha} - V_{electron} = 0.750c - 0.830c = -0.080c.$$

بالنظر إلى الحل، يمكننا أن نرى أن العامل $1/(1 - uv/c^2)$ يُعزّل فرق السرعة المتجهة غير النسبية، عندما تُصبح السرعات المتجهة للإلكترون وجسيم ألفا جزءاً كبيراً من سرعة الضوء، سيُصبح هذا العامل أكبر من 1. وسيكون مقدار فرق السرعة المتجهة النسبية أكبر من مقدار فرق السرعة غير النسبية، ومن ثَمَّ تبدو النتيجة التي نوصلنا إليها منطقتي.

بالفيزياء. نوضح الخطوات السبع المعتادة في إرشادات الحل مع مساعدة إضافية إذا كنت تحتاج إليها.

مثال 9.1

تحديد موقع نقطة باستخدام الإحداثيات الديكارتية والتقطعية

نقطة موقعها محدد بالإحداثيات الديكارتية (4,3). كما هو موضح في الشكل 9.4.

المسألة

كيف يمكننا تمثيل موقع هذه النقطة بالإحداثيات القطبية؟

الحل

باستخدام المعادلة 9.1. يمكننا حساب الإحداثي القطبي:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5.$$

باستخدام المعادلة 9.2. يمكننا حساب الإحداثي الزاوي:

$$\theta = \tan^{-1}(y/x) = \tan^{-1}(3/4) = 0.64 \text{ rad} = 37^\circ.$$

لذا يمكننا التعبير عن موقع النقطة P بالإحداثيات القطبية بالصيغة التالية $(r, \theta) = (5, 0.64 \text{ rad}) = (5, 37^\circ)$. لاحظ أنه يمكننا أن نحدد الموقع نفسه عن طريق جمع (أي مضاعفات صحيحة لـ $2\pi \text{ rad}$ أو 360° على θ ، $(r, \theta) = (5, 0.64 \text{ rad}) = (5, 37^\circ) = (5, 2\pi \text{ rad} + 0.64 \text{ rad}) = (5, 360^\circ + 37^\circ)$.

الأمثلة

أما الأمثلة الموجزة (عبارة المسألة والحل فقط). فتركز على نقطة معينة أو مفهوم معين. كما تمثل هذه الأمثلة حلقة وصل بين الأمثلة المحلولة بالكامل (بالخطوات السبع) ومسائل الواجب المنزلي.

إرشادات حل المسائل: قوانين

نيون الثاني في ذلك الاتجاه. وستساوي محصلة القوة كتلة الجسم مضروبة في عجلته.

4. عندما نحلل متجه قوة إلى مركبات على طول اتجاهات الإحداثيات، انتبه إلى الاتجاه الذي يتضمن جيب زاوية محددة والاتجاه الذي يتضمن جيب التمام. لا نعلم بناءً على المسائل السابقة ونعتقد أن كل المركبات في الاتجاه X تتضمن جيب التمام. لأنك ستجد مسائل تتضمن فيها مركبة X جيب زاوية. اعتمد على التعريفات الواضحة للزوايا واتجاهات الإحداثيات وهندسة الموقف المحدد. حيث تظهر الزاوية نفسها في كثير من الأحيان عند نقاط مختلفة وبين مستقيمتين مختلفة في المسألة. ينتج عن هذا عادةً مثلثات متماثلة. تحتوي غالبًا على زوايا قائمة. إذا صممت رسماً بيانيًا لمسألة تحتوي على زاوية عامة θ . فحاول أن تستخدم زاوية ليست قريبة من 45° . لأنه سيصعب التمييز بين مثل هذه الزاوية وتمتمتها في رسماً.

5. تحقق دائماً من إجاباتك النهائية. هل تبدو الوحدات منطقية؟ هل المعادير معقولة؟ إذا غيرت متغيراً لتتقرب من قيمة حدية. فهل ستجد إجاباتك توقعاً صحيحاً لما سجدت؟ يمكنك تقدير إجابة المسألة أحياناً باستخدام تقريبات القيمة الأسية. فمثل هذا التقدير يكشف غالباً ما إذا ارتكبت خطأ حسابياً أو إذا كتبت صيغة غير صحيحة.

6. دائماً تكون قوة الاحتكاك مضادة لاتجاه الحركة وتؤثر في اتجاه مواز لسطح التلامس. وتكون قوة الاحتكاك السكوني مضادة للاتجاه الذي سيتحرك فيه الجسم. في حالة عدم وجود قوة احتكاك. لاحظ أن قوة الاحتكاك الحركي تساوي دائماً ضرب معامل الاحتكاك في القوة العمودية. بينما تكون قوة الاحتكاك السكوني أقل من ذلك الناتج أو مساوية له.

يتم تحليل الموقف من حيث القوى والحركة مهارة مهمة للغاية في الفيزياء. كما أن التطبيق الصحيح لقوانين نيون من الأساليب بالغة الأهمية. ستساعدك الإرشادات التالية في حل مسائل الميكانيكا من خلال قوانين نيون الثلاثة. كما أنها تشكل جزءاً من استراتيجيات الخطوات السبع لحل كل أنواع مسائل الفيزياء. وهي وثيقة الصلة بخطوات الرسم وفكر والبحث.

1. قد يساعدك الرسم البياني الكلي على التصور المرئي للموقف وتحديد المفاهيم المتضمنة. ولكنك ستحتاج أيضاً إلى مخطط الجسم الحر المنفصل لكل جسم لتحديد القوى المؤثرة في هذا الجسم لا في غيره. ويُعد إنشاء مخططات الجسم الحر الصحيحة مفتاحاً لحل كل المسائل في الميكانيكا. سواء اتضعت أجساماً ساكنة (غير متحركة) أم أجساماً متحركة. تذكر أنه يجب ألا يتضمن أي من مخططات الجسم الحر ma الناتجة عن قانون نيون الثاني باعتبارها قوة.

2. وبعد اختيار النظام الإحداثي منها. فعادةً ما يُعزق اختيار النظام الإحداثي بين المعادلات البسيطة جداً والمعادلات الصعبة للغاية. وفي أغلب الأحيان. يكون من المفيد اختيار محور على طول اتجاه عجلة الجسم نفسه. إن وجدت. وفي مسائل الأجسام الساكنة. سيكون من المفيد عادة توجيه محور على طول سطح. سواء أكان أفقياً أو مائلاً. وبعد اختيار النظام الإحداثي الأكثر ملاءمة مهارة مكتسبة تحصل عليها عن طريق خبرتك التي تزيد مع حل العديد من المسائل.

3. بمجرد اختيار اتجاهات الإحداثيات. حدد ما إذا كان الموقف يتضمن العجلة في أحد الاتجاهين. فعلى سبيل المثال. إذا لم تحدث عجلة في الاتجاه Y . فعندئذٍ تطبيق قانون نيون الأول في هذا الاتجاه. ويساوي مجموع القوى (محصلة القوة) صفراً. إذا حدثت العجلة في اتجاه محدد. على سبيل المثال. في الاتجاه X . فعندئذٍ سيطبق قانون

إرشادات حل المسائل

ترد إرشادات حل المسائل قبل مجموعة التمارين الموجودة في نهاية الوحدة وهي تلخص المهارات أو الأساليب المهمة التي يمكن أن تساعدك في حل المسائل المتعلقة بمحتوى الوحدة. إن النهج المتمثل في هذا الكتاب. هو أنَّ الفيزياء تقوم على أساس مجموعة من الأفكار الأساسية التي يمكن تطبيقها على العديد من المواقف والمشكلات. لذا يؤكد الكتاب على أنه لا توجد طريقة واحدة لحل جميع المسائل ويساعدك على استخدام التفكير الناقد بشأن الطريقة الأكثر فعالية في حل المسائل قبل أن تبدأ في الحل.

مجموعات التمارين وأسئلة نهاية الوحدة

إلى جانب توفير إرشادات وأمثلة واستراتيجيات لحل المسائل. يقدم هذا الكتاب أيضاً مجموعة كبيرة من الأسئلة والتمارين في نهاية الوحدة. وتتضمن كل وحدة أنواعاً عديدة من الأسئلة مثل أسئلة الاختيار من متعدد والأسئلة المفاهيمية والتمارين (في كل قسم) والتمارين الإضافية (ليست حسب الأقسام "مفتاح للحل") وتمارين بمعطيات متعددة. وتوضع على التمرينات الصعبة علامة نقطة واحدة. أما التمرينات الأكثر صعوبة فتوجد عليها علامة نقطتين.

تهييد مبادئ التفاضل والتكامل

يفترض الكتاب معرفة الطالب بالفيزياء والرياضيات في مستوى المرحلة الثانوية. من المفضل أن يكون الطلاب قد درسوا مقرراً تهيدياً في التفاضل والتكامل قبل أن يبدأوا في دراسة هذه المقرر. ويمكن دراسة المقررين في الوقت ذاته. ولتسهيل ذلك الأمر. يورد الكتاب تهييداً لمبادئ التفاضل والتكامل في أحد الملاحق. بحيث يقدم النتائج الأساسية للتفاضل والتكامل بدون ذكر الاشتقاقات الصعبة.

بناء الوعي بالمفاهيم

لمحة عامة عن الوحدة

في بداية كل وحدة، توجد لمحة عامة توضح عناوين الأقسام التي ترد في الوحدة. كما تتضمن أيضًا عناوين الأمثلة والمسائل المحلولة في الوحدة. ومن ثم، تستطيع في نظرة سريعة، أن تعرف ما إذا كانت الوحدة تتضمن موضوعًا أو مثالًا أو مسألة محددة.

ما سنتعلمه/ ما تعلمناه

صُممت كل وحدة من هذا الكتاب بتصميم ندوة بحثية جيدة. وقد قيل في ما سبق "أخبرهم ما سوف نخبرهم به، ثم أخبرهم به، ثم أعد عليهم ما أخبرتهم!" تبدأ كل وحدة بفقرة **ما سنتعلمه** — وهي ملخص سريع للنقاط الأساسية بدون أي معادلات. وفي نهاية كل وحدة، ستجد **ما تعلمناه/ دليل المذاكرة للاختبار** وهما يتضمنان المفاهيم الأساسية بما في ذلك المعادلات الرئيسية.

ما سنتعلمه

- كمية الحركة لجسم ما هي ناتج ضرب كتلته في سرعته المتجهة. وكمية الحركة كمية متجهة وتكون في اتجاه متجه السرعة المتجهة نفسه.
- يمكن التعبير عن قانون نيوتن الثاني بصيغة عامة كما يلي، محصلة القوى المؤثرة في جسم ما تساوي مشتقة الزمن لكمية حركة الجسم.
- يطلق على التغير في كمية الحركة/الدفع، ويُقصد به تكامل محصلة القوى التي تسبب تغير كمية الحركة بالنسبة إلى الزمن.
- في كل التصادمات، يتم حفظ كمية الحركة.
- بالإضافة إلى حفظ كمية الحركة، تتميز التصادمات المرنة أيضًا بخاصية حفظ الطاقة الحركية الإجمالية.
- في التصادمات اللامرنة تمامًا، يتم التخلص من أقصى قدر من الطاقة الحركية وتلتصق الأجسام المتصادمة معًا. ومن ثم، لا يتم حفظ الطاقة الحركية الإجمالية، لكن يتم حفظ كمية الحركة.
- التصادمات التي ليست مرنة وليست لامرنة تمامًا هي تصادمات لامرنة جزئيًا. ويتناسب التغير في الطاقة الحركية مع مربع معامل الارتداد.
- ينطبق حفظ كمية الحركة على المجالات بعيدة المدى مثل فيزياء الجسيمات، حيث تُستخدم في اكتشاف الجسيمات الجديدة ونظرية الفوضى التي تُستخدم لإثبات أنه لا يمكن توقع أنماط الطقس على المدى البعيد.

تقديم المفاهيم

تُشرح المفاهيم في النص الذي يسبق أي شروحات رياضية أو صيغ أو اشتقاقات، وذلك لترسيخ السبب في ضرورة وجود المفهوم أو الكمية وأهميتها، إضافة إلى أهمية تحديدها بدقة. وبعد ذلك، ينتقل المؤلفان من شرح المفاهيم والتعريفات إلى الصيغ والمصطلحات الدقيقة.

سؤال الاختبار الذاتي 5.3

الكتلة معلقة عموديًا من الزنبرك عند إزاحة من موضع الاتزان، تُسحب الكتلة إلى أسفل قليلًا وبعد ذلك يتم تحريرها من السكون. ارسم مخطط الجسم الحر للكتلة في كل من الحالات التالية:

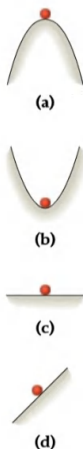
- الكتلة عند إزاحة من موضع الاتزان.
- الكتلة عند أعلى نقطة عمودية لها.
- الكتلة عند أدنى نقطة عمودية لها.

أسئلة الاختبار الذاتي

في كل وحدة، تركز مجموعة من الأسئلة على المفاهيم الرئيسية في النص، وذلك لتشجيع الطلاب على تنمية حوار داخلي. وهذه الأسئلة ستساعد الطلاب على استخدام التفكير الناقد بشأن ما قرؤوه للتو وتحديد ما إذا كانوا يفهمون المفهوم. إضافةً إلى وضع قائمة بأسئلة للمتابعة يسألونها في الصف. توجد إجابات أسئلة الاختبار الذاتي في نهاية كل وحدة.

مراجعة المفاهيم 6.7

أي من الرسومات الأربعة يمثل نقطة اتزان مستقرة للكرة على السطح الداعم لها؟



مراجعة المفاهيم

صُممت مراجعة المفاهيم كي تُستخدم مع تكنولوجيا نظام الإجابة الشخصية. وسوف تظهر في النص حتى تبدأ في التفكير بشأن المفاهيم، لكنَّ الإجابات ستكون متاحة للمعلمين فقط.

دليل الحلول للطالب

يحتوي دليل الحلول للطالب على إجابات وحلول أسئلة معينة من أسئلة نهاية الوحدة والتمارين (المميزة برقم أزرق). وجميع الأسئلة المحلولة في الوحدات من 1 إلى 13، تتبع طريقة الخطوات السبع لحل المسائل، والتي يوضحها القسم 1.5. وفي الوحدات من 14 إلى 40، يقتصر استخدام طريقة الخطوات السبع على التمرينات الصعبة (نقطة واحدة) والتمرينات الصعبة جدًا (نقطتان). أما الأسئلة العادية (بدون نقاط)، فتتوفر لها حلول مختصرة.

إدراك الصورة العامة

أمثلة معاصرة

دمج المؤلفان في الكتاب نتائج بعض الأبحاث الفيزيائية الحديثة، مثل النتائج المتعلقة بالطاقة المتجددة والبيئة والفضاء الجوي والهندسة والطب والتكنولوجيا، حيث توضح تلك الأمثلة أنّ الفيزياء مجال شيق ويحفز على التفكير. يوفر مركز موارد الطالب المتاح عبر الإنترنت على www.mhhe.com/bauerwestfall2e مجموعة من العناصر التي تعزز من فهمك وتساعدك على الاستعداد لمحاضراتك وتجاربك واختبارائك.

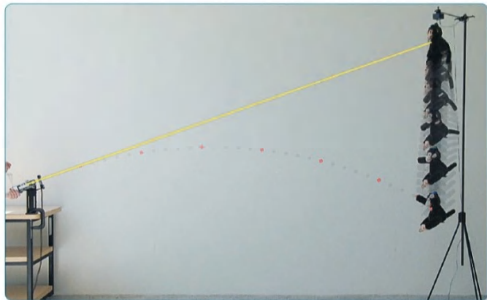
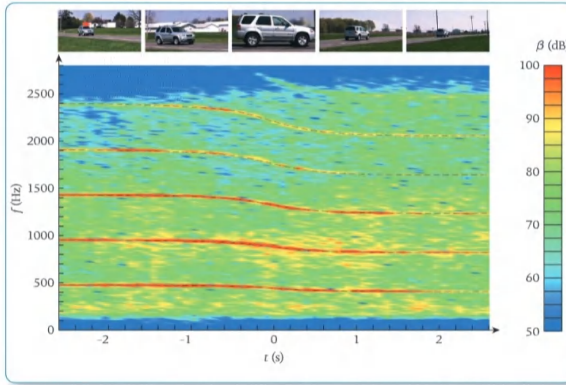
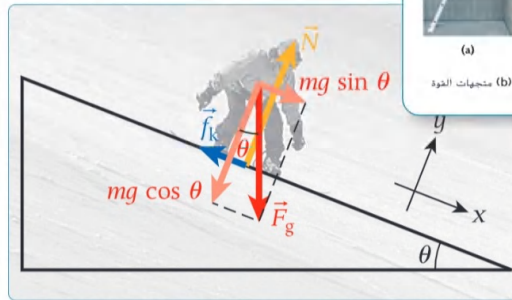
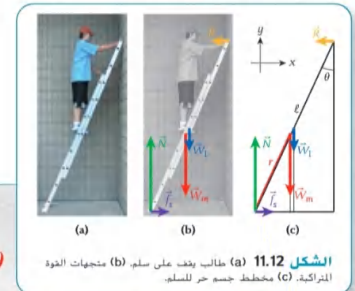
الكتاب الإلكتروني ConnectPlus

يُزودك الكتاب بالوسائط المتعددة، ومنها مقاطع فيديو للمؤلفين وتطبيقات يمكنك من استكشاف المبادئ الأساسية في الفيزياء وكذلك بعض الصور. ويتيح لك الكتاب الإلكتروني إمكانية تدوين الملاحظات والتظليل، إضافةً إلى إمكانية البحث عن كلمات أو عبارات محددة. كما تتوفر جميع الأشكال ومقاطع الفيديو والمحتوى التفاعلي الموجود في الكتاب المدرسي، مع ذكر السطر والوحدة. لذا يمكنك أن تنتقل إلى الموارد التي تربدها مباشرةً. تتضمن واجبات LearnSmart والواجب المنزلي عبر الإنترنت روابط الكتاب الإلكتروني ConnectPlus. حتى إذا واجهت صعوبة في حل أي من التمارين أو استيعاب المفاهيم، يمكنك الانتقال مباشرةً إلى الجزء المتعلق به في الكتاب.

البرنامج البصري

إنّ المعرفة بالمخططات والرسوم المتحركة المتوفرة عبر الإنترنت وألعاب الفيديو، قد رفعت من مستوى وحجم التمثيلات البيانية في الكتب المدرسية. حيث يجب أن تكون متطورة بدرجة كافية لتثير اهتمام الطالب وهيئة التدريس. وفي ما يلي بعض الأفكار والأساليب التي يتضمنها هذا الكتاب:

- أضيفت الرسوم الختية على الصور الفوتوغرافية لربط بعض المفاهيم الفيزيائية المجردة بواقع الطلاب وخبراتهم الحياتية.
- يضيف المظهر ثلاثي الأبعاد للرسومات الختية المرونة للعرض التقديمية. أنشأ المؤلفان تمثيلات بيانية رياضية دقيقة باستخدام برامج حاسوبية مثل Mathematica، كما استخدمهما أيضًا مصممو الرسوم لضمان الجودة الكاملة والمظهر الشيق.



شكر وتقدير

الكتاب وملحقاته باحترافية حتى أخرجوه للنشر. وكل فرد منهم يستحق منا خالص التقدير والعرفان.

وأخيرًا، لم نكن لنبدل كل هذا الجهد لولا دعم عائلتنا الذين ساعدونا على العمل في هذا الكتاب خلال العديد من الأمسيات والعطلات وحتى الأعياد والإجازات. لذا نأمل أن يكون صبرهم وتشجيعهم حقق ثماره، وشكرهم من قلوبنا لمساندتهم إيانا حتى تمكّنّا من إكمال هذا الكتاب.

—فولفجانج باور

—غراي د. ويستفال

المراجعون والمستشارون والمشاركون في الإصدار الثاني

نينا أبرامازون، جامعة كاليفورنيا للتقنية - بومونا

روبال ألبريدج، جامعة فاندربيلت

ديبيش أماراسوريا كلية نورثويست

مايكل ج. أندريسن جامعة كاليفورنيا - سان دييغو

روي أرونفا كلية بونغ هاريس

أرليت بالجون، جامعة سان دييغو

تشارلز بينيش، كلية ويسليان

وارد بيرمان جامعة كاليفورنيا - ريفرسايد

أنجيلا بيسلي، جامعة فيرفيلد

غاي بليلوك، جامعة ماساتشوستس

جيف بودارت، كلية تشيبولا

كينيث بولاند، جامعة أوهايو

بروس بولون، جامعة هاملاين

لوكا بومبيلي، جامعة ولاية ميسيسيبي

غراي د. برانوم، جامعة فريندس

تشارلز بوركهارت، كلية سان لويس الأهلية - فلوريسانت فالي

دانكان كارلسميث، جامعة ويسكونسن - ماديسون

ريان كيس، كلية إلزابيث تاون الأهلية التقنية

جورج كافيريس، كلية ولاية فارمينجديل

سوميترا شاتوبادياي كلية جورجيا هيلاندز

شيدونغ تشين، جامعة سيدارفيل

سكوت كريتيندن، جامعة جنوب كارولاينا

دانييل دالافيف، كلية نيوجيرسي

دانييل ديل جامعة وايومنغ

ديانغارا دوتا، جامعة ولاية ميسيسيبي

س. فيشر، جامعة جورج ماسون

جوهان فرائك، جامعة ولاية لويزيانا

ستوارت غايسز، جامعة شيكاغو

ريتشارد غيلدرمان، جامعة غرب كنتاكي

مارغريت غيبيرت، كلية ويليام ريني هاربر

إنّ إنتاج كتاب كالذي تمسكونه بين أيديكم، لم يكن ليتحقق لولا المجهود العظيم الذي بذله عدد هائل من الأفراد المتفانين. أولاً وقبل كل شيء، نود أن نشكر فريق التحرير والتسويق الموهوب من McGraw-Hill. حيث عمل على الإصدار الأول والثاني من هذا الكتاب: مارتي لانج وكينت بيترسون وتوماس تيمب وريان بلانكنشيب وماري هارلي وليز ريكز وداريل بروفلودت وليزا نيكس ودان والاس. ونخص بالشكر، مايكل لانج وإيف ليبتون وبيل ويلش وكيرت رينولدس وديب هاش. فقد قدموا لنا الكثير من المساعدات وبشتى الطرق. كما أنهم حرصوا على تشجيعنا بعد انتهاء كل مرحلة من مراحل المراجعة. إنّ روح الفريق التي يتمتعون بها وحس الدعاية والتفأول اللامتناهي، شجّعنا على استكمال مسيرتنا وجعل من الساعات الطويلة التي أمضيناها في إنتاج الكتاب، وقتًا ممتعا.

كما ساعدنا محررو التطوير ريتشارد هاينز ودايفيد تشيلتون وماري هارلي وإيف ليبتون، في العمل على التعليقات والاقتراحات الكثيرة التي تلقيناها من المراجعين من أجل تحسين الكتاب. لذا، فإنهم يستحقون وهم وسائر المراجعين والمستشارين، حظًا كبيرًا من الشاء والتقدير لعملهم على تحسين جودة المخطوطة النهائية وكذلك زملائنا في كلية الفيزياء والفلك بجامعة ميشيغان؛ أليكساندرا جيد وأليكس براون وبرنارد بوب وكارل شميت وتشونغ يو روان وك.ب. يوان ودان ستامب وإد براون وهندريك شاتز وكريس ستاروسا وليزا لايبندوس ومايكل هاريسون ومايكل مور ورينهارد شوينهورست وسلامة أحمد وس.ب. ماهانتي وسكوت برات وستان شراير وتيبور ناجي وتوماس دوجيت، فقد ساعدونا مساعداً عظيمة، حيث درسوا لصغوفهم المحتوى الذي طورناه وأمدونا بتعليقاتهم القيمة بشأن النقاط الجيدة والنقاط التي تحتاج إلى التعديل؛ ولذا فإننا نشكرهم جميعًا. كما نشكر كل من ساهموا في وضع المسائل. فقد بذلوا مجهودات عظيمة، ونخص بالشكر ريتشارد هالشتين الذي تولى مهمة تنظيم عمل جميع المساهمين.

وفي هذه المرحلة، عند تسليم النسخة النهائية إلى الناشر، اضطلع فريق جديد بأكمله من المحترفين بالعمل، وأضاف تعديلات جديدة هي التي حولت هذه النسخة إلى كتاب. أما كيرت نورلين وفريق من LaurelTech (وهي فرع من diacriTech)، فقد اضطلعوا بالعمل على مسائل الواجب المنزلي ومراجعة جميع التمارين والأعداد والمعادلات التي كتبناها. كما نشكر فريق البحث عن الصور، وتحديدًا داني ميلدانغ الذي عمل على تحسين جودة الصور المستخدمة في الكتاب بدرجة كبيرة، وجعلوا من عملية الاختيار وقتًا ممتعا. ونشكر أيضًا فريق Precision Graphics الذي استخدم رسومنا الأصلية لكنه حسن جودتها بدرجة كبيرة مع الحفاظ على دقة الحسابات التي أنتجت هذه الرسوم. أما محررة الكتاب جين هوفر، فقد جمعت العمل كله في النهاية. حيث تَقَّمت ما كتبناه وجعلته سهل الفهم والقراءة. أما فريق التصميم من McGraw-Hill وفريق الإنتاج الذي يتكون من جين كلين ودايفيد هاش وكاري برغر وساندي لودوفيسي وتامي جوران وجودي دايفيد وماري باورز وشيري بادن وأدنيث دور فقد أشرفوا على

ب. شيفتزر، جامعة سليبري روك - بنسلفانيا
 أناندا شاستري، جامعة ولاية مينيسوتا - مورهد
 مارلين سيمون، جامعة أوبورن
 دافيد سليبر، جامعة لاندر
 ليه سميت، جامعة سينسنتي
 ستيفينستروث، جامعة جنوب كارولينا
 يوجين سوردوتوفيتش، جامعة أوكلاند
 جون ت. تافيرن، جامعة سامفورد
 مايكل ثاكستون، جامعة تاووزن التقنية
 كينثيا تريفيزان، أكاديمية كاليفورنيا البحرية - جامعة كاليفورنيا
 ماريان تزولوف، جامعة لوك هافن - بنسلفانيا
 ك. فيليسايس، جامعة سنترال فلوريدا
 دافيد فيردونك، كلية إلмира
 مارغريت ويسلينغ، كلية بيرس - لوس أنجليس
 جوزف ويست، كلية ويسليان - ويست فرجينيا
 ويلدون ج. ويلسون، جامعة سنترال أوكلاهاما
 ماثيو وود، معهد فلوريدا للتقنية
 سكوت بوست، ذا سيتادل
 تود يونغ، كلية ولاية ويان

أواد جرجس جامعة نورث كارولينا- شارلوت
 جيمس غرينغ، معهد فلوريدا للتقنية
 باتريك ك. غيبونز، جامعة واشنطن - سانت لويس
 جيمس غيلبرت، جامعة ولاية روز
 ك. غولد، جامعة جنوب كاليفورنيا
 إدوين إ. هاتش، الثالث، معهد روتشستر للتقنية
 مارتن هاكورت، جامعة ولاية إيداهو
 روب هاغود، كلية واشنطن والأهلية
 جيم هام، كلية بيغ بيند الأهلية
 أنولا هيرات، جامعة سليبري روك- بنسلفانيا
 سكوت هيلدرث، كلية شابوت
 باربرا هولينغ جامعة كاليفورنيا للتقنية - بومونا
 ريتشارد هولاند، جامعة جنوب إلينوي وكلية جنوب شرق إلينوي
 جورج إيفو، جامعة كاليفورنيا - لوس أنجليس
 ساي ليار، جامعة واشنطن - سانت لويس
 هوارد جاكسون، جامعة سينسنتي
 أمين جزائري، جامعة جورج ماسون
 كريغ جينسن، كلية نورثن فيرجينيا الأهلية
 روبرت جونسون، جامعة كاليفورنيا - سانتا كروز
 سكوت كينيدي، جامعة أندرسن
 تيموثي كيد، جامعة نورثن أيووا
 يانغسو كيم، جامعة ومعهد فيرجينيا التقنية
 يونغ إ. كيم، جامعة بورو
 بريان كوبرلين، معهد روتشستر للتقنية
 زالتكو كوينوف، جامعة تكساس - سان أنتونيو
 إتشيشيروكونو، جامعة تكساس - سان أنتونيو
 إليا كراجنكو، جامعة نيراسكا - لينكولن
 راتابولي كولاسيري، جامعة تاووزن التقنية
 ألين لانز، جامعة أوبورن
 كوان لي، جامعة سانت لويس الأهلية - ميراميك
 تود ر. ليف، جامعة كلاود كاوتني الأهلية
 بيدرام ليلابادي، جامعة نورث كارولينا - شارلوت
 ستيف ليلينغ، جامعة لونغ آيلاند - سي دابليو بوست
 مايكليزا، جامعة أوهايو
 جورج لوبيز، جامعة تكساس - إلياسو
 هونغ لو، جامعة ولاية نيويورك - بافلو
 كينغشوك ماجومدار، جامعة ولاية غراند فاللي
 ليود ماكروفيش، كلية ولاية فارمينجديل
 بيت ماكروفيش، جامعة فلوريدا الدولية
 بروس ماسون، جامعة أوكلاهاما - نورمان
 كلايسا ماكبرايد، جامعة ناشفيل الأهلية
 آرثر ميرز، جامعة ولاية أيووا
 رودي ميشالوك، جامعة وايومنغ
 جوناثان موريس، جامعة سانت لويس الأهلية - فوريسست بارك
 ل. كينث موريسون، جامعة نيومكسيكو
 ريتشارد موات، جامعة ولاية نورث كارولينا
 راجهاني نارايانان، جامعة فلوريدا الدولية
 بيتر د. بيرسانس، معهد رينسليير للتقنية
 روبرت فيليبين، كلية ولاية ترينيداد
 مايكل بوليتانو، جامعة ماركيت
 أمي بوب، جامعة كليمنسون
 ج. ألبرت بوبسون، الابن كلية ويسليان - ويست فرجينيا
 تومي راغلاند، جامعة نيو ميكسيكو- تاوس
 روبرتو راموس، جامعة دريكسل
 ب. راسموسن، جامعة تكساس - دالاس
 دافيد ريد، جامعة شيكاغو
 أدام رينغستورف، جامعة بورو - كالوميه
 مارك ربراي، كلية بيرمينغهام الجنوبية
 جينا سورسي، كلية هيندس الأهلية

المستشارون والمشاركون والمراجعون والمنقحون للإصدار الأول

الحسان العوض جامعة حائل - المملكة العربية السعودية
 محمد عبد المنعم، جامعة الملك فهد للبترول والمعادن، الظهران.
 المملكة العربية السعودية
 نينا أبرامزون، جامعة كاليفورنيا للتقنية - بومونا
 إدوارد أدلسون، جامعة ولاية أوهايو
 موهان أغراوال، جامعة ألاباما الزراعية والميكانيكية
 سلامة أحمد، جامعة ولاية ميشيغان
 ألبرت أتمان، جامعة ماساتشوستس في لويل
 بول أفيري، جامعة فلوريدا
 دافيد ت. بانون، جامعة ولاية أوريغون
 ماركو باتاغليا، جامعة بيركلي - كاليفورنيا ومختبر بيركلي لورانس
 الوطني
 رينيه بيلويد، جامعة ولاية ويان
 دوغلاس ر. بيرغمان روتجرز، جامعة ولاية نيوجيرسي
 كارلوس برتولاني، جامعة تكساس الزراعية والميكانيكية - كوميرس
 لوكا بيرتلو، جامعة كاليفورنيا - لوس أنجليس
 بيتر بيرسودورف، جامعة ولاية سان جوزيه
 سودب باتاشاريا، معهد ساهل للفيزياء النووية، كولكاتا، الهند
 هلموت بيريتز، معهد جورجيا للتقنية
 كين توماس بولاند، جامعة ولاية أوهايو
 ريتشاردبون، جامعة فلوريدا الدولية
 ديتز بريل، جامعة ميريلاند - كلية بارك
 أليكس براون، جامعة ولاية ميشيغان
 إد براون، جامعة ولاية ميشيغان
 جيسون براون، جامعة كليمنسون
 رونالد براون، جامعة كاليفورنيا التقنية- سان لويس أوبيسبو
 برانتونج، كامبل، جامعة يونغ بريغام
 دانكان كارلسميث، جامعة ويسكونسن - ماديسون
 نول كيسن، جامعة نوتردام
 جون سيرنيه، جامعة ولاية نيويورك - بافلو
 رالف تشامبرلين، جامعة ولاية أريزونا
 ك. كيلفن تشانغ، جامعة تكساس التقنية
 ك. تشرش، جامعة ميامي بأوهايو- أوكسفورد
 يوجينيا شوكان، جامعة كليمنسون
 روبرت كلير، جامعة كاليفورنيا - ريفرسايد
 روي كليرك، جامعة ميشيغان

- ج. م. كولنيز، جامعة ماركيت
برينت أ. كوربين، جامعة كاليفورنيا - لوس أنجلوس
ستيفاني كوتو، جامعة ولاية بنسلفانيا
ويليام داويك، كلية ميلواكي للهندسة
مايك دينين، جامعة كاليفورنيا - أيرفاين
جون ديفلين، جامعة ميشيغان - ديربورن
جون ديناردو، جامعة دريكسل
فيغوس ر. دريمونيس، جامعة كليسون
مايك دويسون، جامعة كولورادو - بولدر
توماسداجت، جامعة ولاية ميشيغان
مايكل دوفرنويس، جامعة هاواي - مانوا
دايفيد إلنور، جامعة بورديو
روبرت إندورف، جامعة سينسباتي
دايفيد إمر، جامعة ولاية ميسيسيبي
هارولد إيفينسن، جامعة ويسكنسن - بلاتيفيل
ليزا ل. إيفريت، جامعة ويسكنسن - ماديسون
غاس إيفراد، جامعة ميشيغان
مايكل قاميانو، جامعة ميشيغان الغربية
فرانك فيرون، جامعة دريكسل
ليونارد فاين غولد، جامعة دريكسل
راي فراي، جامعة أوريغون
أليكساندراجيد، جامعة ولاية ميشيغان
ج. ويليام غراي، جامعة كاليفورنيا - ريفرسايد
ستوارت غايسز، جامعة شيكاغو
ك. غولد، جامعة جنوب كاليفورنيا
ب. غرينشتاين، جامعة كاليفورنيا - سان دييغو
جون ب. غروبر، جامعة ولاية سان جوزيه
شي جان غو، الجامعة الصينية في هونغ كونغ، شانتن، الأقاليم
الجديدة، هونغ كونغ
إدوين إ. هاتش، الثالث، معهد رونشستر للتقنية
ناصر م. حمدان، الجامعة الأمريكية في الشارقة
جون هاردي، جامعة تكساس الزراعية والميكانيكية
كانثين أ. هاربر، جامعة دنيسون
دايفيد هاريسون، جامعة تورنتو
مايكل هاريسون، جامعة ولاية ميشيغان
ريتشارد هاينز، جامعة إنديانا
ساتوشي هينانا، جامعة أوبورن
لورنت هودجز، جامعة ولاية أيوا
جون هويكينز، جامعة ولاية بنسلفانيا
جورج ك. هورتون، جامعة روتجرز
ت. ويليام هوك، جامعة ميامي - أوهايو
إريك هودسون، معهد ماساتشوستس للتقنية
يونغ هاه، جامعة ولاية ساو داكوتا
مصطفى حسين، الأكاديمية العربية للعلوم والهندسة، مصر
أ. ك. هايدر، جامعة نوتردام
دايفيد ك. إنغرام، جامعة أوهايو - أثينا
ديان جاكوب، جامعة ميشيغان الشرقية
أ. ك. جين، إ.إ.ت. روركي
رونجينغ جين، جامعة تينيسي - نوكسفيل
كيت ل. جونز، جامعة تينيسي
ستيفين إ. جونز، جامعة يونغ بريغام
تركي كامون، جامعة تكساس الزراعية والميكانيكية
ليف كابلان، جامعة تولين
جوزيف كابوستا، جامعة مينيسوتا
كانثين كاش، جامعة كيس وسترن ريسرف
سانفورد كيرن، جامعة ولاية كولورادو
إريك كيتاكانون، جامعة غونزاغا
إلين كيركباتريك، معهد روز هالمن للتقنية
كارستن نودسن، جامعة الدانمارك التقنية
بريان د. كوبرلين، معهد روتشستر للتقنية
- و. دافيد كالب، الثالث، معهد جورجيا للتقنية
أجل كوما، جامعة جنوب الهادي، فيجي
فريد كاتنر، جامعة كاليفورنيا - سانتا كروز
ديفيد لامب، جامعة تكساس التقنية
ليزا لايدوس، جامعة ولاية ميشيغان
أندريه لوكليز، جامعة كورنيل
باتريك ر. لوكليز، جامعة ألاباما
لويس لينهر، جامعة ولاية لويزيانا - باتون روج
بيدرا لابلادي، جامعة نورث كارولاينا - شارلوت
مايكل ليذا، جامعة ولاية أوهايو
م.أ.ك. لودهي، جامعة تكساس التقنية
صامويل إ. لوفلاندر، جامعة روان
جيروم لونج، جامعة فيرجينيا للتقنية
س. ب. ماهناتي، جامعة ولاية ميشيغان
أ. جيمس مالمان، كلية ميلواكي للهندسة
بيت ماكأروفيتز، جامعة فلوريدا الدولية
دانييل مارلو، جامعة برينستون
بروس ماسون، جامعة أوكلاهاما
مارتن ماكهيو، جامعة لويولا
مايكل مكلنري، معهد روز هالمن للتقنية
دايفيد مكلنتر، جامعة ولاية أوريغون
بروس ميلادو، جامعة ويسكونسن - ماديسون
مارينا ميلنر-بولوتن، جامعة ريرسون - تورونتو
ك. فريد مور، جامعة تكساس - أوستن
مايكل مور، جامعة ولاية ميشيغان
جيفري مورغان، جامعة نورثرن أيوا
كيران مولن، جامعة أوكلاهاما
نظير مصطفي، جامعة الإمام
تشارلي مايلز، جامعة تكساس التقنية
تيمور ناجي، جامعة ولاية ميشيغان
ريزا نيجات، جامعة ماكماستر
كيرت نيلسون، جامعة غونزاغا
مارك نوباور، جامعة إلينوي في أوربانا - تشامبين
سيندي نير، جامعة ولاية تراين
كريغ أوجيلفي، جامعة ولاية أيوا
برادفورد ج. أور، جامعة ولاية ميشيغان
كارور بادمانابها، جامعة ولاية ويان
كيومارس بارفين، جامعة ولاية سان جوزيه
جاكولين باو، جامعة كاليفورنيا - لوس أنجلوس
تود بيدلار، كلية لوثر
ليو بيلونين، فيرجينيا التقنية
أمي بوب، جامعة كليسون
برنارد بوب، جامعة ولاية ميشيغان
ك. بورسيجان، جامعة بونديشيري - بودوتشيري
سكوت برات، جامعة ولاية ميشيغان
إيرل بروهوفسكي، جامعة بورديو
كلود برونو، جامعة ولاية ويان
وانغ كينغ هاي، جامعة سينغافورة الوطنية
كورنيليو رابلو، جامعة كيترينغ
يوهان رافلسكي، جامعة أريزونا
كينيث ج. راغان، جامعة ماكجيل
روبرتو راموس، جامعة دريكسل
أيان ريدمانوت، جامعة سانت لويس
لورانس ب. ريس، جامعة يونغ بريغام
أندرو ج. ريفرز، جامعة نورثويسترن
جيمس و. رولف، جامعة بوسطن
فيليب روز، جامعة ميريلاند
تشونغ يو روان، جامعة ولاية ميشيغان
دوبرافكا روبنيك، جامعة ولاية لويزيانا
هوميرا ساداغاني، جامعة كاليفورنيا للتقنية - بومونا

إرتان ساليك، جامعة كاليفورنيا للتقنية - بومونا
 أوتو سانكي، جامعة ولاية أريزونا
 سيرجي سافراسوف، جامعة كاليفورنيا - دافيس
 هندريك شاتز، جامعة ولاية ميشيغان
 كارل شميت، جامعة ولاية ميشيغان
 ستان شرايبر، جامعة ولاية ميشيغان
 جون شرودر، معهد رينسبار للتقنية
 رينهارد شوينهورست، جامعة ولاية ميشيغان
 كونات سيباستيان، جامعة ماساتشوستس - لويل
 بيورن سيبيل، جامعة ولاية بورتلاند
 جيرى شاكوف، جامعة نيولين
 رالف شيل، جامعة ترنت
 عرفان صديقي، جامعة كاليفورنيا - بيركلي
 رافيندرا كومار سينها، كلية دلهي للهندسة
 مارلين ل. سيمون، جامعة أوبورن
 أليكس سمول، جامعة كاليفورنيا للتقنية - بومونا
 ليه سميث، جامعة سينسناتي
 تود سميث، جامعة دايون
 شيان نينغ سونغ، كلية ريتشلاند
 جيف سونير، جامعة سيمون فريسر - ساري سنترال
 تشاد إ. سوسوليك، جامعة كليمنسون
 كريس ستاروستا، جامعة ولاية ميشيغان
 دون و. ستوكس، جامعة هيوستن
 جيمس ستون، جامعة بوسطن
 مايكل ج. ستروس، جامعة أوكلاند
 دان ستامب، جامعة ولاية ميشيغان

يانغ سان، جامعة نوتردام
 ستيفن سوينغل، كلية سيتي سان فرانسيسكو
 مريجسيد، معهد روز هالمن للتقنية
 غريغوري تارليه، جامعة ميشيغان
 مارشال تومسن، جامعة ميشيغان الشرقية
 دوغلاس ك. تاسي، جامعة ولاية بنسلفانيا
 سومديف تياجي، جامعة دريكسل
 بريم فيشنافا، جامعة كيترينغ
 إريك و. فارنس، جامعة أريزونا
 جون فاسوت، جامعة بايلور
 غونام فيموري، جامعة إنديانا - جامعة بورديو - إنديانا بوليس
 ثاد ووكر، جامعة ويسكونسن - ماديسون
 فوكيانغ وانغ، جامعة بورديو
 دايغيد ج. ويب، جامعة كاليفورنيا - دافيس
 كيرت ويستفيلد، جورجيا للتقنية
 فريد ويتفيلد، جامعة نيولين
 غراي ويليامز، جامعة كاليفورنيا - لوس أنجلوس
 سان يانغ، جامعة نوتردام
 ل. يو، جورجيا للتقنية
 بيلي يونغر، كلية ألبمارل
 ك. ب. يوان، جامعة ولاية ميشيغان
 أندرو زانغويل، معهد جورجيا للتقنية
 جينز زورن، جامعة ميشيغان - آن أربور
 مايكل زودوف، جامعة مينيسوتا

الحث الكهرومغناطيسي

Electromagnetic Induction

9

226 ما سنتعلمه

226 9.1 تجارب فاراداي

9.2 قانون فاراداي للحث

227 الكهرومغناطيسي

الحث في حلقة دائرية موصلة داخل

229 مجال مغناطيسي

المثال 9.1 فرق الجهد المستحث

230 بواسطة مجال مغناطيسي متغير

المثال 9.2 فرق الجهد

المستحث بواسطة حلقة سلكية موصلة

231 متحركة

232 9.3 قانون لينز

233 التيارات الدوامية

234 جهاز كشف الفلزات

فرق الجهد المستحث المؤثر

في سلك مستقيم متحرك داخل

235 مجال مغناطيسي

المثال 9.3 قمر صناعي مربوط

236 بمكوك فضائي

المثال 9.4 موصل مستقيم يتحرك في مجال

236 مغناطيسي منتظم

مسألة محلولة 9.1 القدرة الكهربائية

237 الناتجة عن ساق دوار

239 9.4 المولدات والمحركات

240 الكبح بالتوليد العاكس

240 9.5 المجال الكهربائي المستحث

241 9.6 حث الملف اللولبي

242 9.7 الحث الذاتي

والحث المتبادل

مسألة محلولة 9.2 الحث المتبادل

243 بين ملفين

244 9.8 دوائر الحث والمقاوم (RL)

مسألة محلولة 9.3 الشغل المبذول

246 بواسطة بطارية

247 9.9 الطاقة وكثافة الطاقة

لمجال مغناطيسي

247 9.10 تطبيقات على تكنولوجيا

المعلومات

248 محرك الأقراص الثابتة في الحاسوب

ما تعلمناه/

250 دليل الدراسة للاختبار

250 إرشادات حل المسائل

251 أسئلة الاختيار من متعدد

252 أسئلة مفاهيمية

252 تمارين

256 تمارين بمعطيات متعددة



الشكل 9.1 يُعد سد جراند كولي على نهر كولومبيا في ولاية واشنطن أكبر وحدة إنتاج فردية للكهرباء في الولايات المتحدة. تظهر هنا المولدات الضخمة التي تطبق مبدأ الحث الفيزيائي لإنتاج الكهرباء.

يُعد معظمنا الطاقة الكهربائية أمراً مسلماً به—حيث نضغط على مفتاح التشغيل ونحصل على الطاقة للإضاءة والتدفئة والترفيه. لكن تعتمد الشبكة الضخمة التي تمدنا بهذه الطاقة—تسمى الشبكة—على مولدات كبيرة تحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية (الشكل 9.1). المبادئ الفيزيائية التي تتيح حدوث هذا التحول هي موضوع هذه الوحدة. في الوحدة 7، رأينا أن المجال المغناطيسي يمكن أن يؤثر في مسار الجسيمات المشحونة أو التيارات الكهربائية، وفي الوحدة 8، رأينا أن التيار الكهربائي يولد مجالاً مغناطيسياً. وفي هذه الوحدة، سنرى أن المجال المغناطيسي المتغير يولد تياراً كهربائياً، ومن ثم مجالاً كهربائياً. لاحظ كلمة "متغير" هنا؛ فإنه كما لا يتولد مجال مغناطيسي إلا عندما تكون الشحنات الكهربائية في حالة حركة، كذلك لا يتكون مجال كهربائي إلا عندما يكون المجال المغناطيسي في حالة حركة (بالنسبة إلى الموصل) أو يتغير بطريقة أخرى كدالة زمن. سيتضح أن هذا التماثل جزء أساسي من الوصف الموحد للكهرباء والمغناطيسية الموضحة في الوحدة 11.

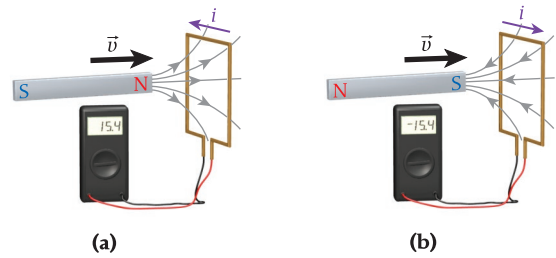
ما سنتعلمه

- يستحث المجال المغناطيسي المتغير داخل حلقة موصلة تيارًا عبر الحلقة.
- يستحث التيار المتغير في حلقة تيارًا في حلقة مجاورة.
- ينص قانون فاراداي للحث على أن فرق الجهد يُستحث في حلقة عند حدوث تغيير في التدفق المغناطيسي عبر الحلقة.
- التدفق المغناطيسي هو ناتج ضرب متوسط المجال المغناطيسي والمنطقة العمودية التي يخترقها.
- ينص قانون لينز على أن التيار المستحث في حلقة بواسطة تدفق مغناطيسي متغير ينتج مجالًا مغناطيسيًا يقاوم هذا التغير في التدفق المغناطيسي.
- يستحث المجال المغناطيسي المتغير مجالًا كهربائيًا.
- الحث الناتج في جهاز هو قياس مقاومته للتغيرات الحادثة في التيار المار خلاله.
- تمثل المحركات الكهربائية والمولدات الكهربائية تطبيقات يومية للحث المغناطيسي.
- تمتلك الدائرة البسيطة أحادية الحلقة بمحث ومقاوم ثابتًا زمنيًا مميزًا يحدد من خلال قسمة الحث على المقاومة.
- تخزن الطاقة في المجال المغناطيسي.

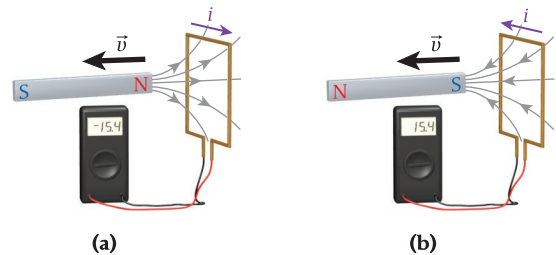
9.1 تجارب فاراداي Faraday's Experiments

حدثت بعض الاكتشافات العظيمة حول الكهرباء والمغناطيسية في أواخر القرن 18 وأوائل القرن 19. وفي عام 1750، أثبت الأمريكي بنجامين فرانكلين أن البرق شكل من أشكال الكهرباء، من خلال تجربته الشهيرة في تخليق الطائرات الورقية. (ربما كان الجانب الأكثر إثارة في تلك التجربة أن ضربة البرق لم تقتله). وفي عام 1799، صنع الإيطالي ألساندرو فولتا أول بطارية، أطلق عليها العمود الفلطايني حينها. وفي عام 1820، برهن الفيزيائي الدنماركي هانز كريستيان أورستد أن التيار الكهربائي يمكن أن ينتج مجالًا مغناطيسيًا قويًا بما يكفي ليحدث انحرافًا في إبرة البوصلة. (أجرى تجربته في أثناء محاضرة أمام طلابه، ما جعلها أحد أكثر العروض التوضيحية في المحاضرات فعالية في تاريخ العلم). ومع ذلك، أجريت التجارب الأكثر صلة بهذه الوحدة في ثلاثينات القرن التاسع عشر بواسطة عالم الكيمياء والفيزياء البريطاني مايكل فاراداي وبشكل مستقل بواسطة الفيزيائي الأمريكي جوزيف هنري. حيث أثبتت أعمالهما أن المجال المغناطيسي المتغير يمكن أن يولد فرق جهد في موصل، قويًا بما يكفي لإنتاج تيار كهربائي. ويمثل هذا الاكتشاف أهمية أساسية لجميع الأجهزة الكهربائية والمغناطيسية التي نستخدمها يوميًا، بدءًا من أجهزة الحاسوب إلى الهواتف المحمولة ومن أجهزة التلفاز إلى بطاقات الائتمان ومن أصغر البطاريات إلى أكبر شبكات الطاقة الكهربائية. وضع كل من فاراداي وهنري وحدات كهربائية أساسية تحمل اسميهما، وهو أمر يمكن تبريره.

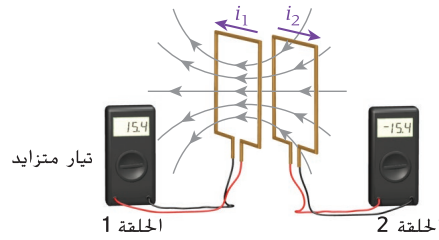
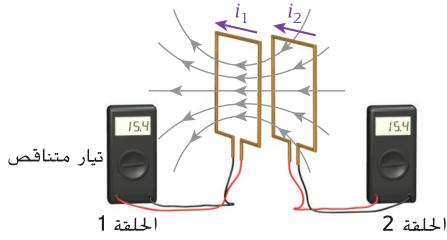
لفهم تجارب فاراداي، فكر في حلقة سلكية متصلة بأميتر. يقع ساق مغناطيسي على مسافة ما من الحلقة وقطبه الشمالي متجه نحو الحلقة. عندما يكون المغناطيس ثابتًا، لا يتدفق تيار في الحلقة. لكن إذا تم تحريك المغناطيس باتجاه الحلقة (الشكل 9.2a)، فسيستحث تيار عكس اتجاه عقارب الساعة في الحلقة كما هو موضح بالتيار الموجب في الأميتر. بينما إذا تم تحريك المغناطيس باتجاه الحلقة بشكل أسرع، فسيستحث تيار أكبر في الحلقة. وإذا تم عكس المغناطيس، بحيث يتجه القطب الجنوبي نحو الحلقة (الشكل 9.2b)، وتحرك نحو الحلقة، فسيستحث تيار في الحلقة في الاتجاه المعاكس. إذا أشار القطب الشمالي للمغناطيس تجاه الحلقة، ثم تم تحريك المغناطيس بعيدًا عن الحلقة (الشكل 9.3a)، فسيستحث تيار سالب في اتجاه عقارب الساعة، كما هو موضح على الأميتر في الشكل 9.3a. في الحلقة. إذا أشار القطب الجنوبي للمغناطيس باتجاه الحلقة، وتم تحريك المغناطيس بعيدًا عن الحلقة (الشكل 9.3b)، فسيستحث تيار موجب. يمكن تكرار النتائج الأربعة الموضحة في الشكلين 9.2 و 9.3 عن طريق تثبيت المغناطيسات وتحريك الحلقات. على سبيل المثال، بالترتيب الموضح في الشكل 9.2a، إذا تم تحريك الحلقة تجاه المغناطيس الثابت، فسيستحث تيار موجب في الحلقة.



الشكل 9.2 يستحث تحريك المغناطيس باتجاه حلقة سلكية تيارًا يتدفق في الحلقة. (a) عندما يشير القطب الشمالي للمغناطيس إلى الحلقة، ينتج تيار موجب. (b) عندما يشير القطب الجنوبي للمغناطيس إلى الحلقة، ينتج تيار سالب.



الشكل 9.3 يستحث تحريك المغناطيس بعيدًا عن حلقة سلكية تدفق تيار في الحلقة. (a) عندما يشير القطب الشمالي للمغناطيس إلى الحلقة، ينتج تيار سالب. (b) عندما يشير القطب الجنوبي للمغناطيس إلى الحلقة، ينتج تيار موجب.



يمكن ملاحظة تأثيرات مماثلة باستخدام حلقتي توصيل (الشكل 9.4). إذا تدفق تيار ثابت عبر الحلقة 1، فلا يستحث أي تيار في الحلقة 2. إذا ازداد التيار المار في الحلقة 1، فيستحث تيارًا في الحلقة 2 في الاتجاه المعاكس. ومن ثم، لا يقوم التيار المتزايد في الحلقة الأولى بتوليد تيار مستحث في الحلقة الثانية فحسب، لكن سيكون التيار المستحث في الاتجاه المعاكس. علاوة على ذلك، إذا تدفق التيار في الحلقة 1 في الاتجاه نفسه كما سبق ثم /نخفض (الشكل 9.5)، فسيستدفع التيار المستحث في الحلقة 2 في اتجاه تدفق التيار في الحلقة 1 نفسه.

يمكن تفسير جميع الظواهر الموضحة في هذه الأشكال الأربعة بقانون فاراداي للحث،

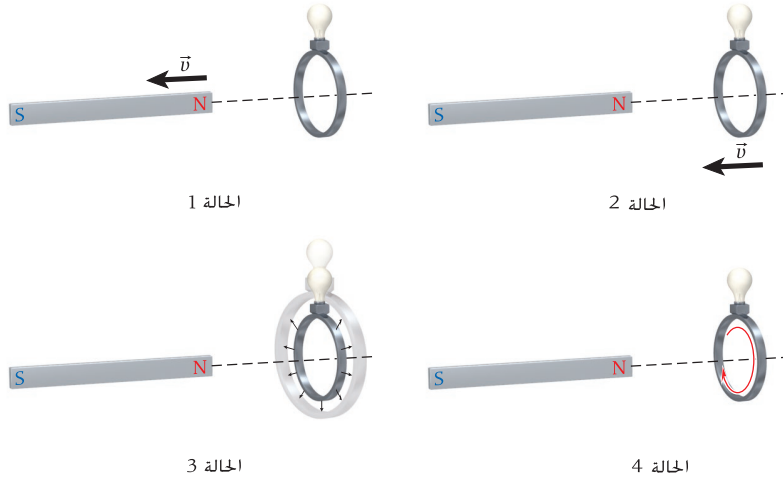
الذي تمت مناقشته في القسم 9.2، وقانون لينز الذي تمت مناقشته في القسم 9.3.

الشكل 9.5 يستحث التيار متناقص في الحلقة 1 تيارًا في الاتجاه ذاته في الحلقة 2.

الشكل 9.4 يستحث التيار المتزايد في الحلقة 1 تيارًا في الاتجاه المعاكس في الحلقة 2. (تمثل خطوط المجال المغناطيسي الموضحة الخطوط الناتجة عن التيار 1 المتدفق عبر الحلقة 1).

مراجعة المفاهيم 9.1

تبيّن الأشكال الأربعة قضيبًا مغناطيسيًا ومصباحًا ضوئيًا منخفض الجهد متصلًا بطرفي حلقة توصيل. مستوى الحلقة عمودي على الخط المتقطع. في الحالة 1، تكون الحلقة ثابتة وتحرك المغناطيس مبتعدًا عنها. في الحالة 2، يكون المغناطيس ثابتًا وتحرك الحلقة في اتجاهه. في الحالة 3، يكون كل من المغناطيس والحلقة ثابتين، ولكن تزداد مساحة الحلقة. في الحالة 4، يكون المغناطيس ثابتًا وتدور الحلقة حول مركزها. في أي حالة من هذه الحالات سيضيء المصباح؟



الحالات الأربع كلها

(c) الحالات 1 و 2 و 3

(d) الحالات 1 و 2 و 4

(a) الحالة 1

(b) الحالتان 1 و 2

9.2 قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي

Faraday's Law of Induction

نستنبط من الملاحظات في القسم السابق أن المجال المغناطيسي المتغير عبر حلقة يستحث تيارًا في الحلقة. يمكننا تصور التغير في المجال المغناطيسي على هيئة تغير في عدد خطوط المجال المغناطيسي المار عبر الحلقة. ينص **قانون فاراداي للحث** في هيئته النوعية على ما يلي:

يُستحث فرق الجهد في حلقة عندما يتغير عدد خطوط المجال المغناطيسي المارة عبر الحلقة بمرور الزمن.

يحدد معدل تغير خطوط المجال المغناطيسي فرق الجهد المستحث. ويعني وجود فرق الجهد هذا أن المجال المغناطيسي المتغير ينتج مجالًا كهربائيًا بالفعل حول الحلقة! ومن ثم، توجد طريقتان لإنتاج مجال



كهربائي؛ من الشحنات الكهربائية ومن المجال المغناطيسي المتغير. إذا نشأ المجال الكهربائي من شحنة، فستكون القوة الكهربائية الناتجة المؤثرة في شحنة اختبارية محافظة. ولا تبذل القوى المحافظة شغلاً عندما تؤثر في جسم يبدأ مساره عند النقطة نفسها في الفضاء وينتهي عندها. وعلى النقيض، تنتج المجالات الكهربائية التي تولدت بفعل المجالات المغناطيسية المتغيرة قوى كهربائية غير محافظة. ومن ثم، سيتم بذل شغل على الجسم الاختباري الذي يتحرك حول حلقة دائرية مرة واحدة بواسطة هذا المجال الكهربائي. وفي الحقيقة، فإن مقدار الشغل المبذول هو فرق الجهد المستحث مضروباً في شحنة الجسم الاختباري.

يحدد مقدار خطوط المجال المغناطيسي عبر التدفق المغناطيسي، قياساً على التدفق الكهربائي. وقد تناولت الوحدة 2 قانون جاوس للمجالات الكهربائية وعرفت التدفق الكهربائي بوصفه التكامل السطحي للمجال الكهربائي المار عبر عنصر مساحة تفاضلي، dA . رياضياً، $\Phi_E = \iint \vec{E} \cdot d\vec{A}$ حيث $d\vec{A}$ متجه المقدار dA المتعامد على المساحة التفاضلية. وبالقياس على ذلك، بالنسبة إلى المجال المغناطيسي، فإن **التدفق المغناطيسي** يُعرف بأنه التكامل السطحي للمجال المغناطيسي المار عبر عنصر مساحة تفاضلي:

$$(9.1) \quad \Phi_B = \iint \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

حيث \vec{B} هو المجال المغناطيسي عند كل عنصر مساحة تفاضلي، $d\vec{A}$ لسطح مغلق. وتعني الحلقة في الرمز المشير إلى التكامل السطحي أن التكامل يوجد عبر سطح مغلق. ويدل التكاملان على وجود تكامل عبر متغيرين. يجب وصف عنصر المساحة التفاضلي dA بدلالة متغيرين مكانيين، مثل x و y في الإحداثيات الديكارتية أو θ و ϕ في الإحداثيات الكروية. مع السطح المغلق، يشير متجه المساحة التفاضلية dA دائماً إلى خارج الحجم المغلق ويكون متعامداً على السطح في كل مكان.

ينتج عن دمج التدفق الكهربائي عبر سطح مغلق (انظر الوحدة 2) قانون جاوس: $\oiint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q/\epsilon_0$ بمعنى أن تكامل التدفق الكهربائي عبر سطح مغلق يساوي الشحنة الكهربائية المضمنة، q . مقسومة على السماحية الكهربائية للمساحة الحرة، ϵ_0 . وينتج عن تكامل التدفق المغناطيسي عبر سطح مغلق صفر:

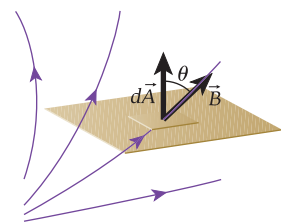
$$(9.2) \quad \oiint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

غالباً ما يطلق على هذه النتيجة مصطلح **قانون جاوس للمجالات المغناطيسية**. قد تعتقد أن تكامل التدفق المغناطيسي عبر سطح مغلق سيكون مساوياً لمقدار "الشحنة المغناطيسية" المضمنة مقسوماً على النفاذية المغناطيسية للمساحة الحرة. لكن، لا توجد شحنات مغناطيسية حرة أو أقطاب أحادية مغناطيسية أو أقطاب شمالية منفصلة أو أقطاب جنوبية منفصلة. حيث توجد الأقطاب المغناطيسية في أزواج دوماً. ومن ثم، يعد قانون جاوس للمجالات المغناطيسية طريقة أخرى للإشارة إلى أن الأقطاب الأحادية المغناطيسية غير موجودة. (تم إجراء أبحاث واسعة عن الأقطاب الأحادية المغناطيسية منذ ثمانينيات القرن العشرين لكنها لم تكلل بالنجاح. ومع ذلك، تتوقع العديد من النظريات المتسلسلة والنظريات الأساسية الموحدة وجود الأقطاب الأحادية المغناطيسية). وثمة طريقة أخرى للإشارة إلى قانون جاوس للمجالات المغناطيسية وهي أن خطوط المجال المغناطيسي ليست لها بداية أو نهاية لكنها تشكل حلقة مستمرة.

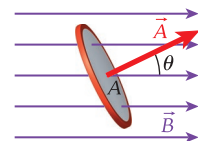
يوضح الشكل 9.6 مجالاً مغناطيسياً غير منتظم، \vec{B} يمر عبر عنصر مساحة تفاضلي، $d\vec{A}$ ويظهر كذلك جزء من السطح المغلق. الزاوية بين المجال المغناطيسي ومتجه المساحة التفاضلية هي θ . فكر في الحالة الخاصة لحلقة مسطحة مساحتها A في مجال مغناطيسي ثابت، كما هو موضح في الشكل 9.7. بالنسبة إلى هذه الحالة، يمكننا إعادة صياغة المعادلة 9.1 على هيئة

$$(9.3) \quad \Phi_B = BA \cos \theta$$

حيث B مقدار المجال المغناطيسي الثابت و A مساحة الحلقة و θ الزاوية بين متجه السطح العمودي على مستوى الحلقة وخطوط المجال المغناطيسي. ومن ثم، إذا كان المجال المغناطيسي متعامداً على مستوى الحلقة، فستكون $\theta = 0^\circ$ و $\Phi_B = BA$. إذا كان المجال المغناطيسي موازياً لمستوي الحلقة، فستكون $\theta = 90^\circ$ و $\Phi_B = 0$.



الشكل 9.6 يمر مجال مغناطيسي غير منتظم \vec{B} عبر المساحة التفاضلية، $d\vec{A}$



الشكل 9.7 حلقة مسطحة مساحتها A في مجال مغناطيسي ثابت، \vec{B} . يصنع المجال المغناطيسي زاوية θ مع متجه السطح العمودي للحلقة.

وحدة التدفق المغناطيسي هي $T m^2$ $[B][A] = [\Phi_B]$. تلقت هذه الوحدة اسمًا خاصًا، وهو **ويبر (Wb)**:

$$(9.4) \quad 1 \text{ Wb} = 1 \text{ T m}^2$$

تمت صياغة قانون فاراداي للحث كميًا، بدلالة التدفق المغناطيسي، كما يأتي:

مقدار فرق الجهد، ΔV_{ind} ، المستحث في حلقة توصيل يساوي معدل تغير التدفق المغناطيسي مع الزمن عبر الحلقة.

ومن ثم يتم التعبير عن قانون فاراداي للحث بالمعادلة

$$(9.5) \quad \Delta V_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

تعد علامة السالب في المعادلة 9.5 ضرورية لأن فرق الجهد المستحث يولد تيارًا مستحثًا يميل مجاله المغناطيسي إلى مقاومة تغير التدفق. يناقش القسم 9.3 عن قانون لينز هذه الظاهرة بالتفصيل.

يمكن تغيير التدفق المغناطيسي بعدة طرق، بما فيها تغيير مقدار المجال المغناطيسي أو تغيير مساحة الحلقة أو تغيير الزاوية التي تكونها الحلقة بالنسبة إلى المجال المغناطيسي. في جميع الحالات التي تنطوي على بعض الأشكال لحركة الموصل بالنسبة إلى مصدر مجال مغناطيسي، فإن فرق الجهد المستحث يسمى **القوة الدافعة الكهربائية المستحثة emf**.

الحث في حلقة دائرية موصلة داخل مجال مغناطيسي

لنطبق المعادلة 9.5 على حلقة سلكية مسطحة داخل مجال مغناطيسي منتظم، حيث يعني منتظم أن المجال له القيمة نفسها (المقدار نفسه والاتجاه نفسه) عند جميع النقاط الموجودة في حيز عند وقت معين لكن قد تختلف مع مرور الوقت. وهذا الترتيب هو أبسط الحالات التي يمكننا تناولها. وفق المعادلة 9.3، يُحدّد التدفق المغناطيسي في هذه الحالة من خلال $\Phi_B = BA \cos \theta$. ووفق المعادلة 9.5، فإن فرق الجهد المستحث عندئذ يكون

$$(9.6) \quad \Delta V_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d}{dt}(BA \cos \theta)$$

يمكننا استخدام قاعدة الضرب من التفاضل والتكامل لتوسيع هذا المشتقة:

$$(9.7) \quad \Delta V_{\text{ind}} = - A \cos \theta \frac{dB}{dt} - B \cos \theta \frac{dA}{dt} + AB \sin \theta \frac{d\theta}{dt}$$

لأن مشتقة الزمن للإزاحة الزاوية هي السرعة الزاوية، $d\theta/dt = \omega$ ، فيكون فرق الجهد المستحث في حلقة مسطحة داخل مجال مغناطيسي منتظم هو

$$(9.8) \quad \Delta V_{\text{ind}} = - A \cos \theta \frac{dB}{dt} - B \cos \theta \frac{dA}{dt} + \omega AB \sin \theta$$

ينتج عن تثبيت اثنين من المتغيرات الثلاثة في المعادلة 9.8 (B و A و θ) الحالات الخاصة الثلاث الآتية:

1. ينتج عن تثبيت مساحة الحلقة واتجاهها بالنسبة إلى المجال المغناطيسي لكن مع تغيير المجال المغناطيسي بمرور الزمن

$$(9.9) \quad \Delta V_{\text{ind}} = - A \cos \theta \frac{dB}{dt} \quad \theta \text{ و } A \text{ ثابتان}$$

2. ينتج عن تثبيت المجال المغناطيسي واتجاه الحلقة بالنسبة إلى المجال المغناطيسي لكن مع تغيير مساحة الحلقة المعرضة للمجال المغناطيسي

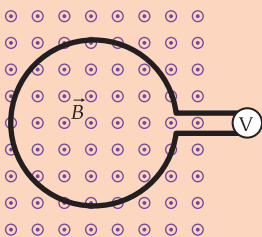
$$(9.10) \quad \Delta V_{\text{ind}} = - B \cos \theta \frac{dA}{dt} \quad \theta \text{ و } B \text{ ثابتان}$$

3. ينتج عن تثبيت المجال المغناطيسي وإبقاء مساحة الحلقة ثابتة لكن مع السماح بتغيير الزاوية بينهما كدالة زمن

$$(9.11) \quad \Delta V_{\text{ind}} = \omega AB \sin \theta \quad B \text{ و } A \text{ ثابتان}$$

سؤال الاختبار الذاتي 9.1

يكون مستوى الحلقة الدائرية الموضحة في الشكل متعامدًا على مجال مغناطيسي مقداره $B = 0.500 \text{ T}$. ينخفض المجال المغناطيسي حتى يصل إلى الصفر بمعدل ثابت في زمن قدره 0.250 s . وبلغ مقدار الجهد المستحث في الحلقة 1.24 V خلال هذا الزمن. فما نصف قطر الحلقة؟



توضح الأمثلة الآتية الحالتين الأوليين. يتناول القسم 9.4 الحالة الثالثة، التي تضم أكثر التطبيقات التقنية فائدة، ما يتعدنا مباشرةً إلى الحركات والمولدات الكهربائية.

مثال 9.1

فرق الجهد المستحث بواسطة مجال مغناطيسي متغير

يتدفق تيار يبلغ 600 mA في ملف لولبي نموذجي، ينتج عنه مجالاً مغناطيسياً يبلغ 0.025 T داخل الملف اللولبي. ثم يزيد التيار بمرور الوقت، t وفق

$$i(t) = i_0 [1 + (2.4 \text{ s}^{-2})t^2]$$

المسألة

إذا يوجد ملف دائري نصف قطره 3.4 cm وعدد لفاته $N = 200$ لفة داخل الملف اللولبي بحيث يكون متجهه العمودي موازياً للمجال المغناطيسي (الشكل 9.8). فأوجد فرق الجهد المستحث في الملف عندما يكون $t = 2.0 \text{ s}$ ؟

الحل

أولاً، نحسب مساحة الملف. حيث إنه ملف دائري، فإن مساحته تكون πR^2 . لكن، يتضمن الملف N من اللفات، ومن ثم تكون المساحة هي مساحة N من الحلقات التي تبلغ مساحة الحلقة الواحدة πR^2 . والنتيجة النهائية هي أن عدد اللفات يعمل كمضاعف بسيط لمساحة الحلقة، وإجمالي المساحة الفعالة للملف هو

$$(i) \quad A = N\pi R^2 = 200\pi(0.034 \text{ m})^2 = 0.73 \text{ m}^2$$

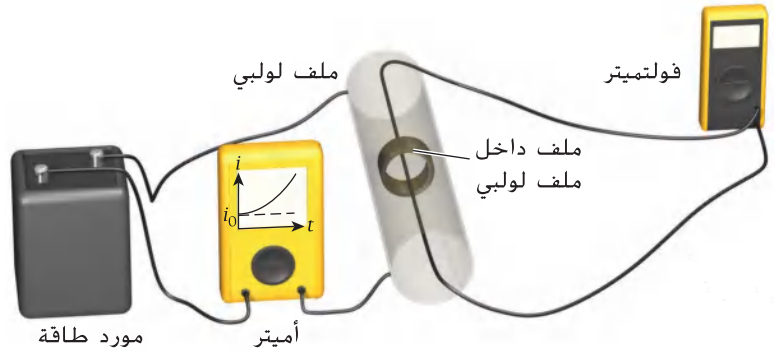
المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي نموذجي هو $B = \mu_0 ni$ ، حيث n هو عدد اللفات لكل وحدة طول، و i هو التيار (راجع الوحدة 8). ولأن المجال المغناطيسي يتناسب مع التيار، فنحصل على التبعية الزمنية للمجال المغناطيسي في هذه الحالة على الفور

$$B(t) = B_0 [1 + (2.4 \text{ s}^{-2})t^2]$$

حيث $B_0 = \mu_0 ni_0 = 0.025 \text{ T}$. وفق نص المسألة. بالإضافة إلى ذلك، فإنه في هذه الحالة تكون مساحة الملف والزاوية بين كل حلقة والمجال المغناطيسي (الذي يساوي صفر) ثابتة. لهذا، تُطبق المعادلة 9.9. ثم نوجد فرق الجهد المستحث، حيث تمثل المساحة A عدد اللفات بالفعل، كما هو موضح في المعادلة (i):

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{ind}} &= -A \cos \theta \frac{dB}{dt} \\ &= -A \cos \theta \frac{d}{dt} [B_0 (1 + (2.4 \text{ s}^{-2})t^2)] \\ &= -AB_0 \cos \theta (2(2.4 \text{ s}^{-2})t) \\ &= -(0.73 \text{ m}^2)(0.025 \text{ T})(\cos 0^\circ)(4.8 \text{ s}^{-2})t \\ &= (-0.088 \text{ V/s})t \end{aligned}$$

عندما يكون الزمن $t = 2.0 \text{ s}$ ، يكون فرق الجهد المستحث في الملف $\Delta V_{\text{ind}} = -0.18 \text{ V}$.

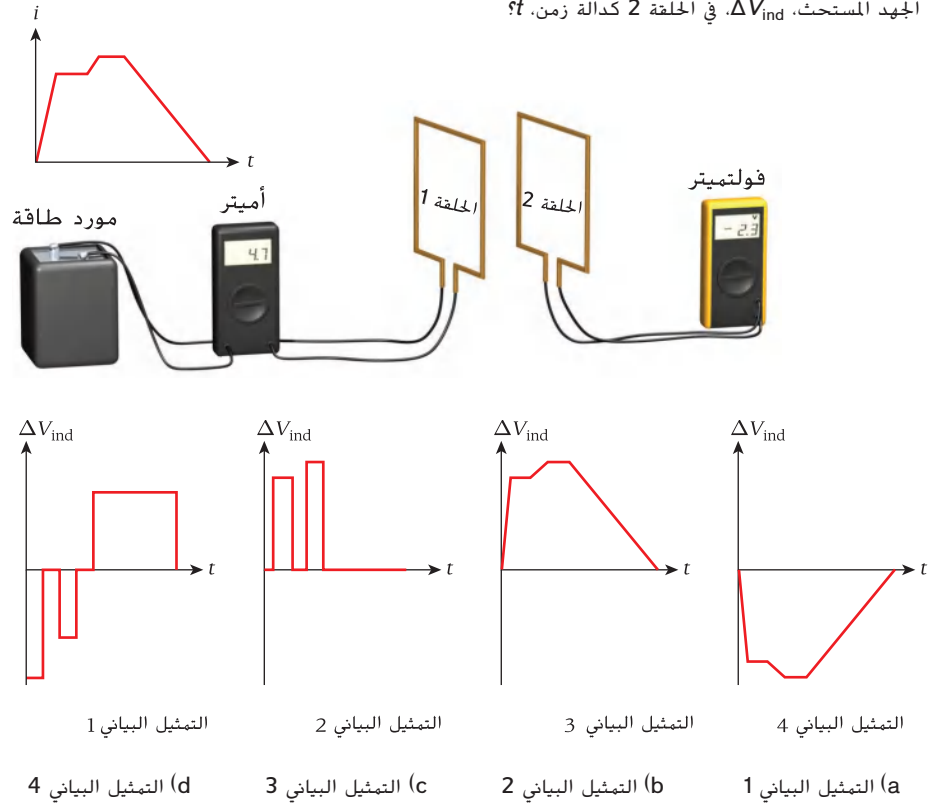


الشكل 9.8 يستحث التيار المتغير مع الزمن والمطبق على ملف لولبي فرق جهد في الملف.

يتم التوصل إلى نقطة عامة مهمة بواسطة المثال 9.1: فرق الجهد المستحث في ملف عدد لفاته N ومساحته A هو ببساطة N مضروباً في فرق الجهد المستحث في حلقة واحدة مساحتها A . تصلح المعادلات من 9.8 إلى 9.11 للملفات متعددة الحلقات، والطريقة الوحيدة لمشاركة عدد اللفات في العمليات الحسابية أن يكون كمضاعف في تحديد المساحة الفعالة للملف.

مراجعة المفاهيم 9.2

يتم توصيل مصدر للطاقة بالحلقة 1 وأميتر كما يوضح الشكل. والحلقة 2 قريبة من الحلقة 1 ومتصلة بفولتميتر. كما يوضح الشكل تمثيلاً بيانياً للتيار i المتدفق عبر الحلقة 1 في صورة دالة للزمن t . أي تمثيل بياني يصف فرق الجهد المستحث، ΔV_{ind} ، في الحلقة 2 كدالة زمن، ft ؟



مثال 9.2

فرق الجهد المستحث بواسطة حلقة سلكية موصلة متحركة

يتم سحب حلقة سلكية مستطيلة عرضها $w = 3.1 \text{ cm}$ وعمقها $d_0 = 4.8 \text{ cm}$ من الفجوة بين مغناطيسين دائمين. يوجد مجال مغناطيسي مقداره $B = 0.073 \text{ T}$ في كل مكان في الفجوة (الشكل 9.9).

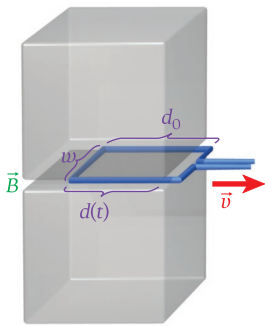
المسألة

إذا تمت إزالة الحلقة بسرعة ثابتة تبلغ 1.6 cm/s ، فأوجد الجهد المستحث في الحلقة كدالة زمن؟

الحل

تتوافق هذه الحالة مع الحالة الخاصة للحث بسبب تغير المساحة. تحكمها المعادلة 9.10. يظل المجال المغناطيسي وأجاء الحلقة بالنسبة إلى المجال ثابتين. نفترض أن الزاوية بين متجه المجال المغناطيسي ومتجه المساحة تساوي صفراً. ما يتغير هي مساحة الحلقة المعرضة للمجال المغناطيسي. مع وجود فجوة ضيقة كتلك الموضحة في الشكل 9.9، يتكون مجال ضئيل للغاية خارج الفجوة، لذلك تكون المساحة الفعالة من الحلقة المعرضة للمجال هي $A(t) = (w)(d(t))$ ، حيث $d(t) = d_0 - vt$ هو عمق الجزء من الحلقة الموجود داخل المجال المغناطيسي خلال الزمن t . بينما لا تزال الحلقة بأكملها داخل الفجوة، لا يتم إنتاج أي جهد. بفرض أن زمن وصول الحافة اليمنى للحلقة عند الطرف الأيمن للفجوة هو $t = 0$ ، يكون لدينا

$$A(t) = (w)(d(t)) = w(d_0 - vt)$$



الشكل 9.9 تُسحب حلقة سلكية (زرقاء) من فجوة بين مغناطيسين.

- يُتبع

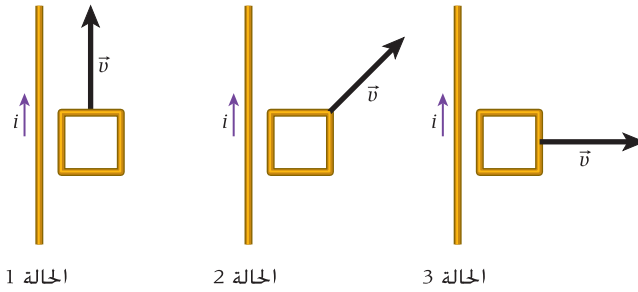
وتكون هذه الصيغة صالحة حتى تصل الحافة اليسرى للحلقة إلى الطرف الأيمن للفتحة. وبعد ذلك تساوي مساحة الحلقة المعرضة للمجال المغناطيسي صفراً. تصل الحافة اليسرى في زمن يبلغ $s = 3.0$ $t_f = d/v = (4.8 \text{ cm})/(1.6 \text{ cm/s}) = 3.0$ $A(t > t_f) = 0$ من خلال المعادلة 9.10. نجد أن

$$\begin{aligned}\Delta V_{\text{ind}} &= -B \cos \theta \frac{dA}{dt} \\ &= -B \cos \theta \frac{d}{dt} [w(d_0 - vt)] \\ &= wvB \cos \theta \\ &= (0.031 \text{ m})(0.016 \text{ m/s})(0.073 \text{ T}) \cos 0^\circ \\ &= 3.6 \times 10^{-5} \text{ V}\end{aligned}$$

خلال الفاصل الزمني بين 0 و 3 s، يُستحث فرق جهد ثابت قدره $36 \mu\text{V}$ ، ولا يُستحث أي فرق جهد خارج هذا الفاصل الزمني.

مراجعة المفاهيم 9.3

يحمل سلك طويل تياراً i ، كما يوضح الشكل. وتتحرك حلقة مربعة الشكل في المستوى نفسه الذي يتحرك فيه السلك، كما هو موضح. في أي من الحالات ستحتوي الحلقة على تيار مستحث؟



- الحالتان 1 و 2
- الحالتان 1 و 3
- الحالتان 2 و 3
- لن تحتوي أي من الحلقات على تيار مستحث.
- ستحتوي الحلقات كلها على تيار مستحث.

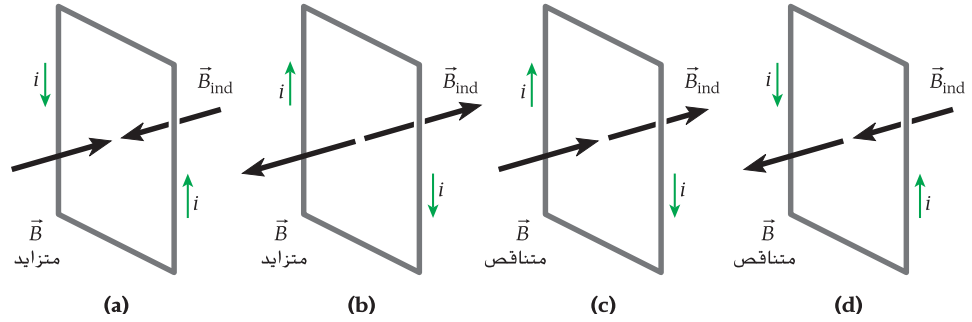
9.3 قانون لينز Lenz's Law

يطرح قانون لينز قاعدة لتحديد اتجاه تيار مستحث في حلقة. سيكون للتيار المستحث اتجاه بحيث يكون المجال المغناطيسي الناتج عن التيار المستحث **مقاوماً** للتغير في التدفق المغناطيسي الذي يستحث التيار. يمكن استخدام اتجاه التيار المستحث لتحديد مواقع الجهد الأعلى والأقل.

فلنطبق قانون لينز على الحالات الموضحة في القسم 9.1. الوضع الموضح في الشكل 9.2a يتضمن تحريك مغناطيس في اتجاه حلقة بحيث يكون القطب الشمالي متجهاً نحو الحلقة. في هذه الحالة، تشير خطوط المجال المغناطيسي بعيداً عن القطب الشمالي للمغناطيس. عندما يتحرك المغناطيس في اتجاه الحلقة، يزداد مقدار المجال المغناطيسي داخل الحلقة، في اتجاه يشير نحو الحلقة، كما هو موضح في الشكل 9.10a. ينص قانون لينز على أن التيار المستحث في الحلقة يميل إلى مقاومة التغير في التدفق المغناطيسي. ويشير المجال المغناطيسي المستحث، B_{ind} عندئذٍ إلى الاتجاه المعاكس لاتجاه المجال بسبب المغناطيس.

في الشكل 9.2b، يتحرك مغناطيس تجاه حلقة بحيث يكون القطب الجنوبي في اتجاه الحلقة. في هذه الحالة، تشير خطوط المجال المغناطيسي نحو القطب الجنوبي للمغناطيس. عندما يتحرك المغناطيس في اتجاه الحلقة، يزداد مقدار المجال في الاتجاه الذي يشير نحو القطب الجنوبي، كما هو موضح في الشكل 9.10b. حيث ينص قانون لينز على أن التيار المستحث يولد مجاًلاً مغناطيسياً يميل إلى مقاومة الزيادة في التدفق المغناطيسي. يشير المجال المستحث إلى الاتجاه المعاكس لاتجاه خطوط المجال بسبب المغناطيس. بالمثل، يمثل الشكل 9.10c والشكل 9.10d الحالات الموضحة في الشكل 9.3a والشكل 9.3b. على التوالي، في هاتين الحالتين، ينخفض مقدار التدفق المغناطيسي ويُستحث تيار على نحو ينتج مجاًلاً مغناطيسياً يقاوم هذا الانخفاض. وفي كلتا الحالتين، يُستحث تيار في الحلقة على نحو يولد مجاًلاً مغناطيسياً يشير في اتجاه المجال المغناطيسي الصادر من المغناطيس نفسه.





الشكل 9.10 العلاقة بين المجال المغناطيسي الخارجي \vec{B} والتيار المستحث i ، والمجال المغناطيسي \vec{B}_{ind} الناتج عن ذلك التيار المستحث: (a) يستحث المجال المغناطيسي المتزايد والمتجه إلى اليمين تياراً يولد مجالاً مغناطيسياً متجهاً إلى اليسار. (b) يستحث المجال المغناطيسي المتزايد والمتجه إلى اليسار تياراً يولد مجالاً مغناطيسياً متجهاً إلى اليمين. (c) يستحث المجال المغناطيسي المتناقص والمتجه إلى اليمين تياراً يولد مجالاً مغناطيسياً متجهاً إلى اليمين. (d) يستحث المجال المغناطيسي المتناقص والمتجه إلى اليسار تياراً يولد مجالاً مغناطيسياً متجهاً إلى اليسار.

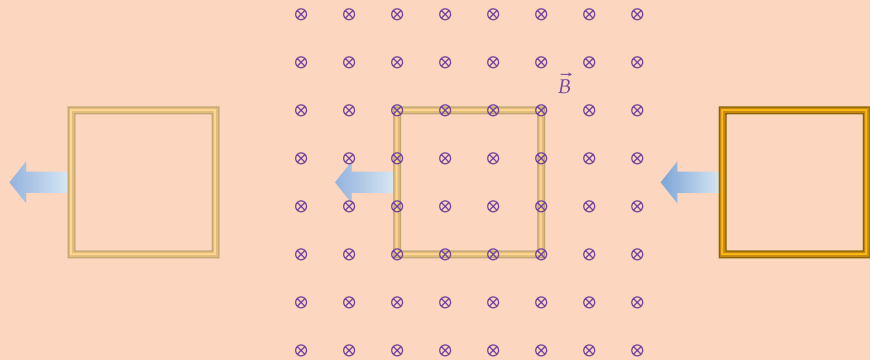
في حال وجود حلقتين تتضمن إحداهما تياراً متغيراً، يُطبق قانون لينز بالطريقة نفسها. يستحث التيار المتزايد في الحلقة 1 في الشكل 9.4 تياراً في الحلقة 2 على نحو يولد مجالاً مغناطيسياً يقاوم الزيادة في التدفق المغناطيسي. كما هو موضح في الشكل 9.10b. يستحث التيار المتناقص في الحلقة 1 في الشكل 9.5 تياراً في الحلقة 2 على نحو يولد مجالاً مغناطيسياً يقاوم الانخفاض في التدفق المغناطيسي. كما هو موضح في الشكل 9.10d.

سؤال الاختبار الذاتي 9.3

افترض أن قانون لينز كان ينص بدلاً من ذلك على أن المجال المغناطيسي المستحث يزيد من التدفق المغناطيسي. ما يعني أن قانون فاراداي للحث كان سيكتب على الصورة $\Delta V_{\text{ind}} = +d\Phi_B/dt$. أي إشارة موجه بدلاً من الإشارة السالبة. فكيف ستكون النتائج؟ هل يمكنك شرح لماذا كان سيؤدي هذا إلى وجود تناقض؟

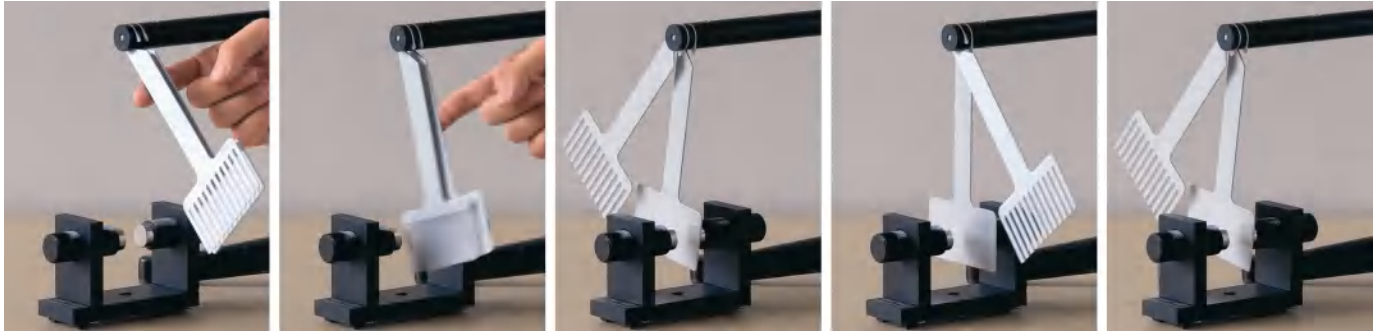
سؤال الاختبار الذاتي 9.2

يتم تحريك حلقة سلكية مربعة توصيل مقاومتها صغيرة جداً بسرعة ثابتة من منطقة خالية من المجال المغناطيسي مروراً بمنطقة ذات مجال مغناطيسي ثابت، ثم إلى منطقة خالية من المجال المغناطيسي. كما يوضح الشكل. ماذا كان اتجاه التيار المستحث عند دخول الحلقة في المجال المغناطيسي؟ وماذا كان اتجاه التيار المستحث عند خروج الحلقة من المجال المغناطيسي؟



التيارات الدوامية

لنتخيل بندولين، يتضمن كل منهما صفيحة فلزية موصلة غير مغناطيسية عند الطرف مصممة للمرور عبر الفجوة بين مغناطيسيين دائمين قويين (الشكل 9.11). إحداهما صفيحة فلزية مصممة، والأخرى تتضمن شقوقاً. تم سحب البندولين إلى جانب واحد ثم تحريرهما. توقف البندول ذو الصفيحة الفلزية المصمتة في الفجوة، بينما مرت الصفيحة المشقوقة عبر المجال المغناطيسي، تتباطأ حركتها قليلاً فحسب. يوضح هذا العرض التوضيحي الظاهرة ذات الأهمية الكبيرة **التيارات الدوامية المستحثة**. عندما يدخل البندول ذو الصفيحة المصمتة المجال المغناطيسي بين المغناطيسين. فإن قانون لينز ينص على أن التدفق المغناطيسي المتغير يستحث التيارات التي تميل إلى مقاومة التغير في التدفق. وتنتج هذه التيارات مجالات مغناطيسية مستحثة تقاوم المجال الخارجي الذي أنتج التيارات. تتفاعل هذه المجالات المغناطيسية المستحثة مع المجال المغناطيسي الخارجي (عبر تدرجاتها المكانية) لإيقاف البندول. وتنتج



الشكل 9.11 بندولان، يتكون أحدهما من ذراع ولوح فلزي مُصمت ويتكون الآخر من ذراع ولوح فلزي مشقوق. تمثل الإطارات الخمسة تسلسلاً زمنياً من اليسار إلى اليمين، حيث بدأ البندولان التحرك معاً في الإطار الثاني من اليسار. يتوقف البندول ذو اللوح المُصمت في الفجوة، بينما يمر البندول ذو اللوح المشقوق خلال الفجوة.

التيارات المستحثة الأكبر مجالات مغناطيسية مستحثة أكبر، ومن ثم تؤدي إلى تباطؤ أسرع في حركة البندول. وبالنسبة إلى الصفيفة المشقوقة، يتم تقسيم التيارات الدوامية المستحثة بواسطة الشقوق، وتُمر الصفيفة المشقوقة عبر المجال المغناطيسي، تتباطأ حركتها قليلاً فحسب. التيارات الدوامية ليست مثل التيار غير الموجه والمنتظم المستحث في الحلقة الواردة في المثال 9.2، لكنها دوامات ملتفة مثل تلك التي تظهر في المياه المتدفقة المضطربة.

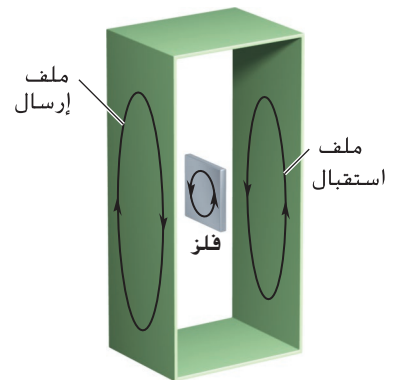
إلى أين تذهب الطاقة في حركة البندول ذي الصفيفة المصمتة في الشكل 9.11—أو بعبارة أخرى، كيف توقف التيارات الدوامية البندول؟ الإجابة تتمثل في أن التيارات الدوامية تشتت الحرارة في الفلز نظراً إلى مقاومتها المحدودة، كما تم مناقشته في الوحدة 5. كلما كانت التيارات الدوامية المستحثة أقوى، تحولت الطاقة بشكل أسرع من حركة البندول إلى حرارة. لذلك تتباطأ حركة الصفيفة المشقوقة، ذات التيارات الدوامية المستحثة الأصغر، قليلاً فقط عند مرورها عبر الفجوة بين المغناطيسين (على الرغم من أن التباطؤ سيوقفها في النهاية).

غالباً ما تكون التيارات الدوامية غير مرغوب فيها، ما يجبر مصممو المعدات على تقليلها عن طريق تجزئة الأجهزة الكهربائية التي يجب أن تعمل في بيئة من المجالات المغناطيسية المتغيرة أو تقسيمها إلى رفائق. ومع ذلك، يمكن أن تكون التيارات الدوامية مفيدة كذلك ويتم توظيفها في تطبيقات عملية معينة، مثل مكابح عربات القطار.

جهاز كشف الفلزات

بعد المرور عبر أجهزة كشف المعادن، خاصة في المطارات، جزءاً لا يمكن تجنبه من الحياة هذه الأيام. فيعمل جهاز كشف الفلزات باستخدام الحث الكهرومغناطيسي، ويطلق عليه غالباً الحث النبضي. يتضمن جهاز كشف الفلزات ملف إرسال وملف استقبال. حيث يتم تمرير تيار متردد في ملف الإرسال، الذي ينتج عنده مجالاً مغناطيسياً متردداً. (التردد يعني متغيراً كدالة زمن بين القيم الموجبة والسالبة. وستقدم الوحدة 10 المزيد من التعريفات الدقيقة والنتائج الفيزيائية والتفاصيل الرياضية المتعلقة بالتيار المتردد). عند زيادة المجال المغناطيسي لملف الإرسال وانخفاضه، فإنه يستحث تياراً في ملف الاستقبال يحيل إلى مقاومة التغير في التدفق المغناطيسي الناتج عن ملف الإرسال. ويقاس التيار المستحث في ملف الاستقبال عندما لا يوجد إلا الهواء بين الملفين. إذا كان الموصل على شكل جسم فلزي يمر بين ملفي الإرسال والاستقبال، فسيستحث تيار في الجسم الفلزي على شكل تيارات دوامية. وستعمل هذه التيارات الدوامية على مقاومة الزيادة والانخفاض في المجال المغناطيسي المتغير الناتج عن ملف الإرسال، الذي بدوره يستحث تياراً في ملف الاستقبال يحيل إلى مقاومة الزيادة في التيار المار في الفلز. سيكون التيار المتحس في ملف الاستقبال أقل عند وجود أي جسم فلزي بين الملفين.

يظهر رسم تخطيطي لجهاز كشف الفلزات في المطار في الشكل 9.12. يقع ملف الإرسال وملف الاستقبال على جانبيين متقابلين لباب الدخول. ويمر الشخص أو الجسم المطلوب مسحه عبر الباب بين الملفين. بفرض أن التيار المار في ملف الإرسال يتدفق في الاتجاه الموضح ويزداد. سيستحث تيار في الصفيفة الفلزية في الاتجاه المعاكس وسيميل إلى مقاومة الزيادة في التيار المار في ملف الإرسال. وسيستحث التيار المتزايد المار في الصفيفة الفلزية تياراً في ملف الاستقبال الموجود في الاتجاه المقابل ويميل إلى مقاومة الزيادة في التيار المار في الصفيفة الفلزية (غير موضح في الرسم التخطيطي). ومن ثم، تستحث الصفيفة الفلزية تياراً في ملف الاستقبال يتدفق في اتجاه التيار المار



الشكل 9.12 رسم تخطيطي لجهاز كشف الفلزات في المطار.

في ملف الإرسال نفسه. ومن دون الصفيفة الفلزية، يستحث التيار المتزايد المار في ملف الإرسال تيارًا في الاتجاه المقابل في ملف الاستقبال الذي يميل إلى مقاومة الزيادة في التيار المار في ملف الإرسال (كما هو موضح في الرسم التخطيطي). ومن ثم، يكون التأثير الكلي للصفيفة الفلزية في جهاز كشف الفلزات هو تقليل التيار الملاحظ في ملف الاستقبال. ولا يجب أن يكون الجسم الفلزي عبارة عن صفيفة مسطحة؛ حيث ستولد تيارات مستحثة في أي قطعة فلزية، شريطة أن تكون كبيرة بما يكفي، يمكن اكتشافها بواسطة قياس التيار المستحث في ملف الاستقبال.

تستخدم أجهزة كشف الفلزات كذلك للتحكم في إشارات المرور. في هذا التطبيق، يتم تضمين حلقة سلكية مستطيلة، تعمل كمف إرسال واستقبال معًا، في سطح الطريق. يتم تمرير نبضة من التيار عبر الحلقة، التي تستحث تيارات دوامية في أي فلز بالقرب من الحلقة. ويقاس التيار المار في الحلقة بعد اكتمال نبضة التيار. عندما تمر سيارة على سطح الطريق فوق الحلقة، تتسبب التيارات الدوامية المستحثة في فلز السيارة في قياس تيار مختلف بين النبضات، الذي بدوره يحفز إشارة المرور للتحويل إلى اللون الأخضر (بعد تأخير مناسب للسماح للمركبات الأخرى بإخلاء التقاطع بالطبع!). أما على أسطح الطرق القديمة، فيمكنك غالبًا رؤية آثار مستطيلة الشكل في الأسفلت ناتجة عن تعديل التقاطعات بإضافة حلقات الحث هذه.

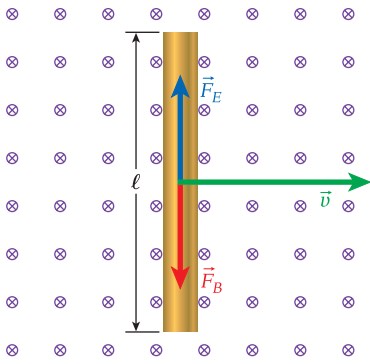
فرق الجهد المستحث المؤثر في سلك مستقيم متحرك داخل مجال مغناطيسي

تخيل سلك موصل بطول ℓ يتحرك بسرعة متجهة ثابتة \vec{v} عموديًا على مجال مغناطيسي ثابت، \vec{B} باتجاه إلى داخل الصفحة (الشكل 9.13). تم توجيه السلك بحيث يكون متعامدًا على السرعة المتجهة والمجال المغناطيسي. ويؤثر المجال المغناطيسي بقوة، \vec{F}_B في إلكترونات التوصيل الموجودة في السلك، ما يجعلها تتحرك للأسفل. تنتج حركة الإلكترونات هذه محصلة شحنة سالبة عند الطرف السفلي من السلك ومحصلة شحنة موجبة عند الطرف العلوي من السلك. وينتج عن فصل الشحنة هذا مجالًا كهربائيًا، \vec{E} يبذل قوة على إلكترونات التوصيل، \vec{F}_E تميل إلى إلغاء القوة المغناطيسية. بعد مرور الزمن، تصبح القوتان متساويتين في المقدار (لكنهما متضادتان في الاتجاه) حيث ينتجان محصلة قوة تساوي صفرًا:

$$(9.12) \quad F_B = evB = F_E = eE$$

ومن ثم، يمكن التعبير عن المجال الكهربائي المستحث بواسطة

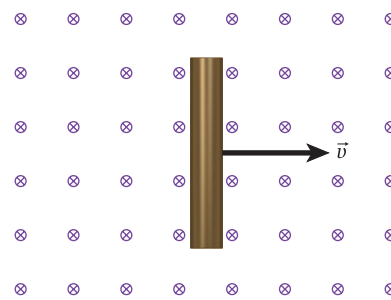
$$(9.13) \quad E = vB$$



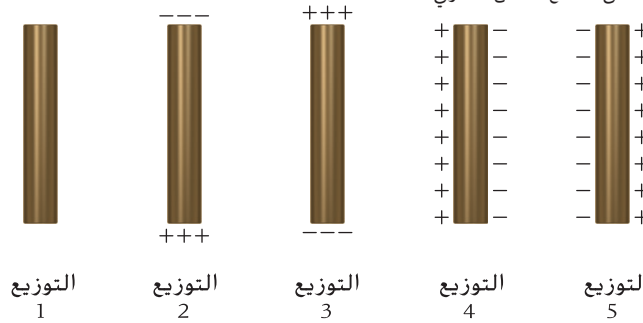
الشكل 9.13 موصل متحرك في مجال مغناطيسي ثابت. يوضح الشكل تأثير القوتين المغناطيسية والكهربائية في إلكترونات التوصيل.

مراجعة المفاهيم 9.4

يتحرك عمود معدني بسرعة متجهة ثابتة \vec{v} في مجال مغناطيسي منتظم متجه إلى الصفحة، كما يوضح الشكل.



أي مما يلي يمثل توزيع الشحنة على سطح الساق الفلزي بأدق صورة؟



نظرًا إلى أن المجال الكهربائي ثابت في السلك، فينتج فرق جهد بين طرفي السلك يمكن تحديده بواسطة

(9.14)

$$E = \frac{\Delta V_{\text{ind}}}{\ell} = vB$$

عندئذ يكون فرق الجهد المستحث بين طرفي السلك هو

(9.15)

$$\Delta V_{\text{ind}} = v\ell B$$

هذا أحد أشكال القوة الدافعة الكهربائية الحركية، الواردة في القسم 9.2.

قمر صناعي مربوط بمكوك فضائي

مثال 9.3

في عام 1996، أطلق المكوك الفضائي كولومبيا قمرًا صناعيًا مربوطًا بسلك يمتد مسافة 20. km (الشكل 9.14). تم توجيه السلك عموديًا على المجال المغناطيسي لكوكب الأرض عند تلك النقطة، وبلغ مقدار المجال $B = 5.1 \times 10^{-5} \text{ T}$. كان المكوك كولومبيا يسافر بسرعة 7.6 km/s.

المسألة

كم بلغ فرق الجهد المستحث بين طرفي السلك؟

الحل

يمكننا استخدام المعادلة 9.15 لتحديد فرق الجهد المستحث بين طرفي السلك. حيث يبلغ طول السلك $L = 20.0 \text{ km}$ وسرعة السلك عبر المجال المغناطيسي للأرض ($B = 5.1 \times 10^{-5} \text{ T}$) تساوي سرعة المكوك الفضائي، البالغة $v = 7.6 \text{ km/s}$. ومن ثم، يكون لدينا

$$\Delta V_{\text{ind}} = vLB = (7.6 \times 10^3 \text{ m/s})(20.0 \times 10^3 \text{ m})(5.1 \times 10^{-5} \text{ T}) = 7.8 \text{ kV}$$

قاس رواد الفضاء على المكوك الفضائي نيازًا تبلغ شدته 0.5 A تقريبًا عند جهد يبلغ 3.5 kV. وتكونت الدارة من السلك الذي تم إطلاقه والذرات المتأينة في الفضاء على أنها مسار عودة التيار. انقطع السلك عند وصول طول الانتشار إلى 20. km. لكن تم إثبات تولد التيار الكهربائي من حركة المركبة الفضائية.



الشكل 9.14 تصور أحد الفئتين للمكوك الفضائي كولومبيا والقمر الصناعي المتصل به.

كانت المسألة المحلولة 8.2 تتعلق بالساق الكهرومغناطيسي. ويركز المثال التالي على ظاهرة الحث في نظام مماثل.

موصل مستقيم يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم

المثال 9.4

سحب موصل مستقيم أفقيًا بقوة ثابتة قدرها، $F = 5.00 \text{ N}$ ، على طول مجرى يتكون من سلك على شكل حرف U ويبعد طرفا السلك عن بعضهما مسافة $a = 0.500 \text{ m}$ (الشكل 9.15). ولا يحدث أي احتكاك بين الموصل والمجرى. يتجه مجال مغناطيسي منتظم مقداره $B = 0.500 \text{ T}$ إلى داخل الصفحة. ويتحرك الموصل بسرعة ثابتة، $v = 5.00 \text{ m/s}$.

المسألة

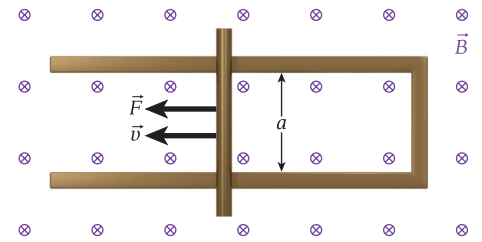
أوجد مقدار فرق الجهد المستحث في الدائرة التي يشكلها الموصل والمجرى خلال حركة الموصل.

الحل

يحدد فرق الجهد المستحث من خلال المعادلة 9.10، والتي تسري على حلقة في مجال مغناطيسي عندما تكون الزاوية والمجال المغناطيسي ثابتين بينما تتغير مساحة الحلقة مع الزمن:

$$\Delta V_{\text{ind}} = -B \cos \theta \frac{dA}{dt}$$

في هذه الحالة، $\theta = 0$ و $B = 0.500 \text{ T}$. تتزايد مساحة الحلقة مع الزمن. يمكننا التعبير عن مساحة الحلقة بدلالة A_0 ، المساحة قبل بدء الموصل في الحركة، ومساحة



الشكل 9.15 يتم سحب موصل على طول ساق توصيل بسرعة متجهة ثابتة في مجال مغناطيسي منتظم ومتجه إلى الصفحة.

إضافية يمكن تحديدها بناتج ضرب سرعة الموصل وزمن تحركه مضروباً في المسافة، a بين طرفي السلك:

$$A = A_0 + a(vt) = A_0 + vta$$

عندئذ يكون تغير مساحة الحلقة كدالة زمن هو

$$\frac{dA}{dt} = \frac{d}{dt}(A_0 + vta) = va$$

ومن ثم، يكون مقدار فرق الجهد المستحث هو

$$(i) \quad \Delta V_{\text{ind}} = \left| -B \cos \theta \frac{dA}{dt} \right| = vaB$$

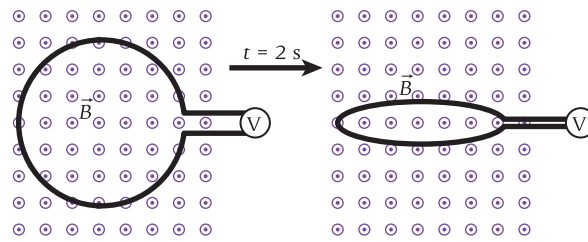
بإدراج القيم العددية، نحصل على

$$\Delta V_{\text{ind}} = (5.00 \text{ m/s})(0.500 \text{ m})(0.500 \text{ T}) = 1.25 \text{ V}$$

لاحظ أن المعادلة $\Delta V_{\text{ind}} = vaB$ ، (i)، التي اشتقناها من قانون فاراداي للحث، لها هيئة المعادلة 9.15 نفسها لإيجاد فرق الجهد المستحث في سلك يتحرك في مجال مغناطيسي، تم توليده باستخدام القوة المغناطيسية المؤثرة في الشحنات المتحركة.

مراجعة المفاهيم 9.5

توضع حلقة سلكية في مجال مغناطيسي منتظم. وخلال فترة زمنية قدرها 2 s، تتقلص الحلقة. أي عبارة مما يلي تُعدّ صحيحة فيما يتعلق بفرق الجهد المستحث؟



(a) سيكون ثمة قدر ما من فرق الجهد المستحث.

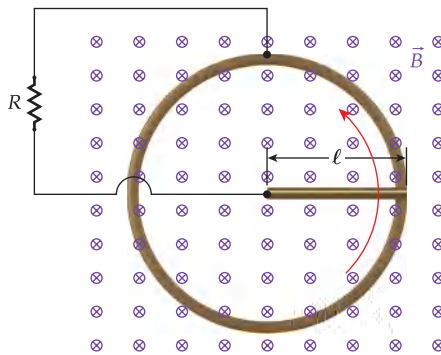
(b) لن يكون ثمة فرق جهد مستحث، لأن الحلقة بتغير حجمها على طول محور واحد دون المحور الآخر.

(c) لن يكون ثمة فرق جهد مستحث، لأن الحلقة ليست مغلقة.

(d) لن يكون ثمة فرق جهد مستحث، لأن الحلقة تتقلص.

مسألة محلولة 9.1

القدرة الكهربائية الناتجة عن ساق دوار



ساق موصل طوله $\ell = 8.17 \text{ cm}$ يدور حول أحد طرفيه داخل مجال مغناطيسي منتظم مقداره $B = 1.53 \text{ T}$ وفي اتجاه مواز لمحور دوران الساق (الشكل 9.16). بينما ينزلق الطرف الآخر للساق على حلقة موصلة عديمة الاحتكاك. يصنع الساق 6.00 دورة في الثانية. تم توصيل مقاوم، $R = 1.63 \text{ m}\Omega$ ، بين الساق والدوار وحلقة التوصيل.

المسألة

أوجد مقدار القدرة المبذولة في المقاوم بسبب الحث المغناطيسي؟

الحل

فكر يمكننا حساب فرق الجهد المستحث في موصل طوله ℓ يتحرك بسرعة v عمودياً على مجال مغناطيسي مقداره B . لكن، يمتلك الساق الدوار سرعات مختلفة عند أنصاف أقطار مختلفة، $v(r)$. لذلك، يجب علينا حساب فرق الجهد المستحث في الساق بدمج $Bv(r)$ على طول الساق. ومن فرق الجهد المستحث، يمكننا حساب القدرة المبذولة في المقاوم.

ارسم الشكل 9.17 يوضح السرعة كدالة نصف قطر للساق الموصل.

ابحث يحدد فرق الجهد، ΔV_{ind} ، المستحث في موصل طوله ℓ يتحرك بسرعة v عمودياً على مجال مغناطيسي مقداره B بواسطة المعادلة 9.15:

$$\Delta V_{\text{ind}} = v\ell B$$

الشكل 9.16 يدور الساق الموصل في مجال مغناطيسي ثابت ومتجه إلى الصفحة.

لكن، في هذه الحالة تتحرك أجزاء مختلفة من الساق الموصل بسرعات مختلفة. ويمكننا التعبير عن سرعة الأجزاء المختلفة من الساق كدالة مسافة r من محور الدوران:

$$v(r) = \frac{2\pi r}{T}$$

حيث $v(r)$ هي سرعة الساق عند المسافة r و T هي الزمن الدوري. يمكننا بعدئذٍ إيجاد فرق الجهد المستحث في الساق الدوار عبر طوله ℓ :

$$(i) \quad \Delta V_{\text{ind}} = \int_0^{\ell} v(r) B dr$$

يمكن تحديد القدرة المبذولة في المقاوم بواسطة

$$(ii) \quad P = \frac{\Delta V_{\text{ind}}^2}{R}$$

بسط بتقييم التكامل المحدد في المعادلة (i) نحصل على

$$(iii) \quad \Delta V_{\text{ind}} = \int_0^{\ell} \left(\frac{2\pi r}{T} \right) B dr = \frac{2\pi B}{T} \frac{\ell^2}{2} = \frac{\pi B \ell^2}{T}$$

بالتعويض عن التعبير ΔV_{ind} من المعادلة (iii) في المعادلة (ii) يؤدي إلى تعبير عن القدرة المبذولة في المقاوم:

$$P = \frac{(\pi B \ell^2 / T)^2}{R} = \frac{\pi^2 B^2 \ell^4}{RT^2}$$

احسب المدة تساوي معكوس التردد. التردد هو $f = 6.00 \text{ Hz}$. إذا المدة تساوي

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{6.00} \text{ s}$$

من خلال التعويض بالقيم العددية نحصل على

$$P = \frac{\pi^2 B^2 \ell^4}{RT^2} = \frac{\pi^2 (1.53 \text{ T})^2 (0.0817 \text{ m})^4}{(1.63 \times 10^{-3} \Omega) \left(\frac{1}{6.00} \text{ s} \right)^2} = 22.7345 \text{ W}$$

قرب نقرّب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$P = 22.7 \text{ W}$$

تحقق ثانية للتحقق ثانيةً من النتيجة، نتخيل ساق له الطول نفسه يتحرك عمودياً على المجال المغناطيسي نفسه بسرعة مساوية لسرعة مركز الساق الدوار، وهي

$$v(\ell/2) = \frac{2\pi(\ell/2)}{T} = \frac{2\pi L}{2T} = \frac{2\pi(0.0817 \text{ m})}{2\left(\frac{1}{6.00} \text{ s}\right)} = 1.54 \text{ m/s}$$

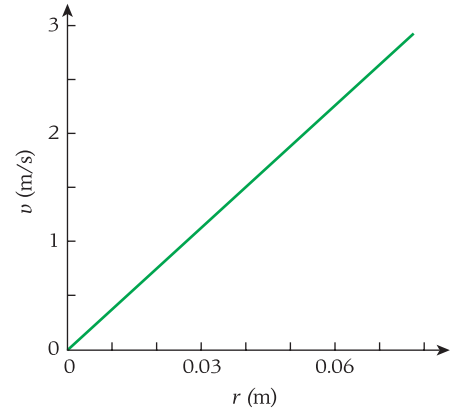
سيكون فرق الجهد المستحث عبر الساق الموصل المتحرك عمودياً هو

$$\Delta V_{\text{ind}} = v\ell B = (1.54 \text{ m/s})(0.0817 \text{ m})(1.53 \text{ T}) = 0.193 \text{ V}$$

عندئذٍ ستكون القدرة المبذولة في المقاوم

$$P = \frac{\Delta V_{\text{ind}}^2}{R} = \frac{(0.193 \text{ V})^2}{1.63 \times 10^{-3} \Omega} = 22.9 \text{ W}$$

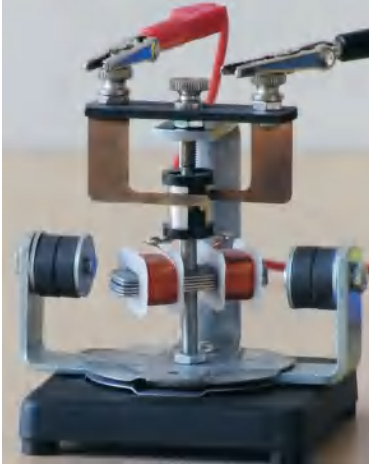
وهي قريبة من نتائجنا ضمن نطاق خطأ التقريب. ومن ثمّ، تبدو النتيجة التي توصلنا إليها منطقية. وأخيراً، لاحظ أنه ثمة مصدر إضافي يمكن لفرق الجهد بين طرفي الموصل. افترض الحل الذي اتبعناه أن فرق الجهد بين الطرفين ناتج عن الحث المغناطيسي فقط. ومع ذلك، تسير جميع ناقلات الشحنات داخل الموصل في مسار دائري قسراً نتيجة الدوران. يتطلب ذلك قوة جذب مركزي، والتي يجب أن تقلل فرق الجهد بين طرفي الموصل من حيث المبدأ. لكن، بالنسبة إلى السرعة الزاوية الصغيرة للموصل في هذه المسألة، فإن هذا التأثير يمكن تجاهله.



الشكل 9.17 السرعة كدالة نصف قطر بالنسبة إلى الساق الموصل.

Generators and Motors

9.4 المولدات والمحركات

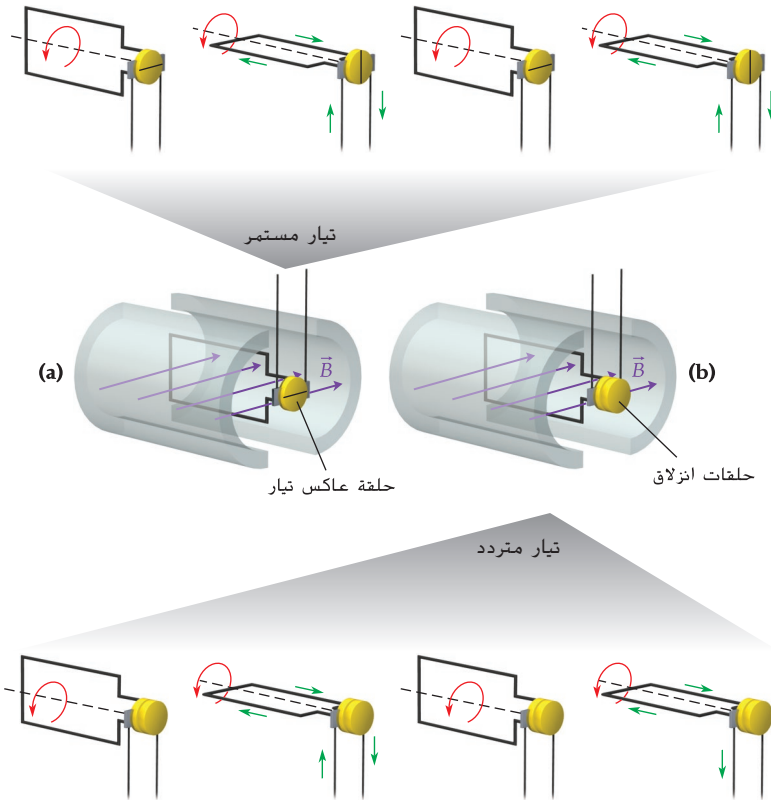


تعد الحالة الخاصة الثالثة لعملية الحث الأساسية الموضحة في القسم 9.2 هي الأكثر إثارة للاهتمام الناحية التكنولوجية حتى الآن. في هذه الحالة، تتغير الزاوية بين حلقة التوصيل والمجال المغناطيسي بمرور الزمن، مع بقاء مساحة الحلقة وشدة المجال المغناطيسي ثابتة. وفي هذه الحالة، يمكن استخدام المعادلة 9.11 لتطبيق قانون فاراداي للحث على توليد التيار الكهربائي واستخدامه. ويُطلق على الجهاز الذي ينتج تيارًا كهربائيًا من الحركة الميكانيكية اسم **المولد الكهربائي**. بينما يُطلق على الجهاز الذي ينتج حركة ميكانيكية من التيار الكهربائي اسم **المحرك الكهربائي**. يوضح الشكل 9.18 محركًا كهربائيًا بسيطًا للغاية.

يتكون المولد البسيط من حلقة تدور فسرًا داخل مجال مغناطيسي ثابت. ويمكن توفير القوة التي تتسبب في دوران الحلقة بواسطة البخار الساخن المتدفق عبر التوربين، كما يحدث في محطات الطاقة النووية والتي تعمل بالضغط. (تستخدم محطات توليد الطاقة العديد من الحلقات في الواقع لزيادة إنتاج الطاقة). وعلى الجانب الآخر، يمكن تدوير الحلقة بواسطة المياه أو الرياح المتدفقة لتوليد الكهرباء بطريقة خالية من التلوث.

يوضح الشكل 9.19 نوعين من المولدات البسيطة. في مولد التيار المستمر، يتم توصيل الحلقة الدوارة بدائرة خارجية عبر حلقة عاكس تيار مشقوفة، كما هو موضح في الشكل 9.19a. عند دوران الحلقة، ينعكس الاتصال مرتين في الدورة، لذا يحمل فرق الجهد المستحث العلامة نفسها دائمًا. يوضح الشكل 9.19b نظامًا مماثلًا يستخدم لتوليد تيار متردد. التيار المتردد هو تيار يختلف بمرور الزمن بين القيم الموجبة والسالبة، مع إظهار هذا الاختلاف لنموذج أمواج متعاقبة غالبًا. يتصل كل طرف من الحلقة بدائرة خارجية عبر حلقة الانزلاق المصممة الخاصة بها. ومن ثم، يُنتج هذا المولد فرق جهد مستحث يختلف من الموجب إلى السالب والعكس. المولد الذي ينتج جهدًا مترددًا والتيار المتردد الناتج يسمى كذلك **مولد التيار المتردد**. يوضح الشكل 9.20 فرق الجهد المستحث كدالة زمن لكل نوع مولد.

يمكن كذلك استخدام الأجهزة الواردة في الشكل 9.19 كمحركات عبر توفير التيار للحلقة واستخدام الحركة الناتجة عنها لبذل شغل.



الشكل 9.19 (a) مولد/محرك بسيط للتيار المستمر (DC). مولد/محرك بسيط للتيار المتردد (AC).

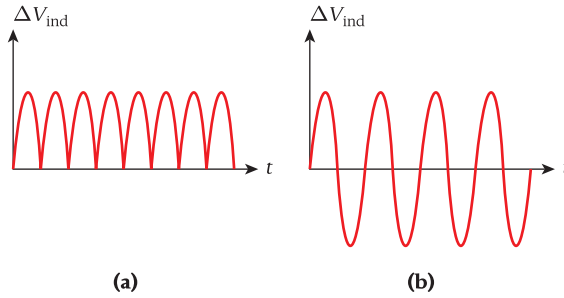
الشكل 9.18 محرك كهربائي بسيط للغاية يُستخدم في العروض التوضيحية في المحاضرات. ويتكون من زوج من المغناطيسات الدائرية من الخارج وملفّين لولبيين، يتدفق عبرهما التيار، من الداخل.

سؤال الاختبار الذاتي 9.4

يعمل مولد من خلال تدوير ملف عدد لفاته N لفة في مجال مغناطيسي ثابت مقداره B بتردد f ، ومقاومة الملف R ومساحة مقطعه العرضي A . حدّد ما إذا كانت كل عبارة من العبارات التالية صوابًا أم خطأ.

- يتضاعف متوسط فرق الجهد المستحث إذا تضاعف التردد f .
- يتضاعف متوسط فرق الجهد المستحث إذا تضاعفت المقاومة R .
- يتضاعف متوسط فرق الجهد المستحث إذا تضاعف مقدار المجال المغناطيسي B .
- يتضاعف متوسط فرق الجهد المستحث إذا تضاعفت المساحة A .



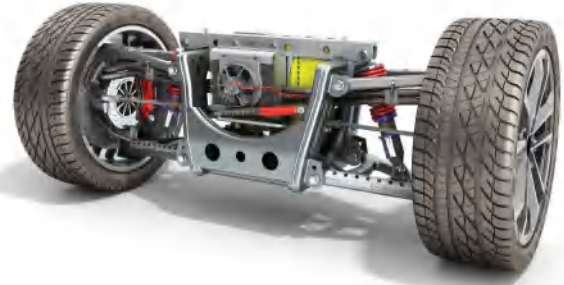


الشكل 9.20 فرق الجهد المستحث كدالة زمن بالنسبة إلى (a) مولد بسيط للتيار المستمر؛ (b) مولد بسيط للتيار المتردد.

تعد المولدات والمحركات المستخدمة في الحياة اليومية أكثر تعقيدًا من الأمثلة البسيطة الواردة في الشكل 9.19. على سبيل المثال، بدلًا من المغناطيسات الدائمة، يولد التيار المتدفق في الملفات المجال المغناطيسي المطلوب. بينما تُستخدم العديد من الحلقات المتقاربة للغاية لتحقيق استخدام أكثر كفاءة للحركة الدورانية. وتخل الحلقات المتعددة كذلك مشكلة توقف محرك بسيط أحادي الحلقة في وضع لا ينتج فيه التيار المار عبر الحلقة أي عزم. وقد يتغير المجال المغناطيسي كذلك بمرور الزمن بشكل متزامن مع الحلقة الدوارة. وفي بعض المولدات والمحركات، تتوقف حركة الحلقات (الملفات) بينما يدور المغناطيس.

الكبح بالتوليد المعاكس

تسير السيارات الهجينة عن طريق مزيج من طاقة الجازولين والطاقة الكهربائية. وإحدى الميزات الجذابة للسيارة الهجينة أنها قادرة على **الكبح بالتوليد المعاكس**. وعند استخدام المكابح لإبطاء مركبة غير هجينة أو إيقافها، تتحول الطاقة الحركية للمركبة إلى حرارة في بطانات المكابح. فتتبدد هذه الحرارة في البيئة، وتُفقد الطاقة. بينما في السيارة الهجينة تتصل المكابح بمحرك كهربائي (الشكل 9.21) يشحن بطارية السيارة حيث يعمل كمولد. ومن ثم، تُسترد الطاقة الحركية للسيارة جزئيًا في أثناء الكبح، ويمكن استخدام هذه الطاقة لاحقًا لتحريك السيارة، ما يسهم في رفع كفاءتها ويزيد كفاءة الوقود عند التوقف كثيرًا في أثناء القيادة.



الشكل 9.21 تُستخدم مكابح التجديد على العجلات الخلفية للسيارة الهجينة لإبطاء السيارة وتحويل طاقتها الحركية إلى طاقة كهربائية مخزنة في بطارية الليثيوم أيون.

9.5 المجال الكهربائي المستحث Induced Electric Field

ينص قانون فاراداي للحث على أن التدفق المغناطيسي المتغير ينتج فرق جهد مستحث، يمكن أن يؤدي إلى توليد تيار مستحث. ما نتائج هذا التأثير؟

تخيل شحنة موجبة q تتحرك في مسار دائري نصف قطره r في مجال كهربائي \vec{E} . فإن الشغل المبذول على الشحنة يساوي تكامل ناغ الضرب القياسي للقوة ومتجه الإزاحة التفاضلي. فلنفترض حاليًا أن المجال الكهربائي \vec{E} ثابت، وأن له خطوط مجال دائرية وأن الشحنة تتحرك بطول أحد هذه الخطوط. وخلال لفة واحدة للشحنة، يتم تحديد مقدار الشغل المبذول عليها بواسطة

$$\oint \vec{F} \cdot d\vec{s} = \oint q\vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint q \cos 0^\circ E ds = qE \oint ds = qE(2\pi r)$$

حيث إن الشغل المبذول بواسطة مجال كهربائي ثابت هو $\Delta V_{\text{ind}} q$ ، فنحصل على

$$\Delta V_{\text{ind}} = 2\pi r E$$

يمكننا تعميم هذه النتيجة باعتبار أن الشغل المبذول على شحنة q تتحرك بطول مسار عشوائي مغلق هو:

$$W = \oint \vec{F} \cdot d\vec{s} = q \oint \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

بالتعويض مرة أخرى بـ $\Delta V_{\text{ind}} q$ عن الشغل المبذول، نحصل على

$$\Delta V_{\text{ind}} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (9.16)$$

يمكننا الآن التعبير عن فرق الجهد المستحث بطريقة مختلفة من خلال دمج المعادلة 9.5 مع المعادلة 9.16:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (9.17)$$

تنص المعادلة 27.17 على أن التدفق المغناطيسي المتغير يستحث مجالاً كهربائياً. ويمكن تطبيق هذه المعادلة على أي مسار مغلق في مجال مغناطيسي متغير، حتى وإن لم يوجد موصل في المسار.

9.6 حث الملف اللولبي Inductance of a Solenoid

تخيل ملفاً لولبياً طويلاً بعدد لفات N يحمل تياراً i . يولد هذا التيار مجالاً مغناطيسياً في مركز الملف اللولبي، ما ينتج عنه تدفق مغناطيسي شدته، Φ_B . ويمر التدفق المغناطيسي نفسه عبر جميع لفات الملف اللولبي البالغ عددها N . من المعتاد تعريف **التدفق الكلي** على أنه حاصل ضرب عدد اللفات والتدفق المغناطيسي، أو $N\Phi_B$. بينما عرفت المعادلة 9.1 التدفق المغناطيسي على أنه $\Phi_B = \iint \vec{B} \cdot d\vec{A}$ ويكون متجه المجال المغناطيسي والمتجه العمودي للسطح $d\vec{A}$ متوازيين داخل الملف اللولبي. وكما لاحظنا في الوحدة 8 أن مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي هو $B = \mu_0 ni$ حيث $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A}$ هي النفاذية المغناطيسية للفراغ و i شدة التيار و n عدد اللفات لكل طول وحدة ($n = N/\ell$). لذا، يتناسب التدفق المغناطيسي في الجزء الداخلي من الملف اللولبي مع التيار المار عبر الملف اللولبي، والذي يعني بصورة مبسطة أن التدفق الكلي يتناسب مع التيار كذلك. ويمكننا التعبير عن هذا التناسب على النحو

$$N\Phi_B = Li \quad (9.18)$$

باستخدام ثابت التناسب L ، المسمى **معامل الحث**. (ملاحظة: استخدام الحرف L لتمثيل معامل الحث هو المتعارف عليه. وعلى الرغم من استخدام L كذلك لتمثيل الكمية الفيزيائية للطول والكمية الفيزيائية للحركة الزاوية، فإن معامل الحث لا يرتبط بأي منهما على الإطلاق).
معامل الحث L يمثل التدفق الكلي الناتج عن ملف لولبي لكل وحدة تيار. وحدة معامل الحث هي **هنري (H)**، وهي مسماة على اسم الفيزيائي الأمريكي جوزيف هنري (1797-1878) وتحدد بالمعادلة الآتية

$$[L] = \frac{[\Phi_B]}{[i]} \Rightarrow 1 \text{ H} = \frac{1 \text{ T m}^2}{1 \text{ A}} \quad (9.19)$$

يعني تعريف وحدة الهنري المقدم في المعادلة 9.19 أن النفاذية المغناطيسية للفراغ يمكن تحديدها كذلك بالمعادلة $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$.
فلنستخدم الآن المعادلة 9.18 لإيجاد معامل الحث الكهربائي للملف اللولبي الذي تبلغ مساحة المقطع العرضي له A وطوله ℓ . والتدفق الكلي لهذا الملف اللولبي هو

$$N\Phi_B = (n\ell)(BA) \quad (9.20)$$

حيث n عدد اللفات لكل وحدة طول و B مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي. ومن ثم، يتم تحديد معامل الحث الكهربائي بواسطة

$$L = \frac{N\Phi_B}{i} = \frac{(n\ell)(\mu_0 ni)(A)}{i} = \mu_0 n^2 \ell A \quad (9.21)$$

تعد المعادلة السابقة لمعامل الحث L للملف لولبي جيدة للملفات اللولبية الطويلة لأن تأثيرات مجال الحافة عند نهايات الملف اللولبي هذا تكون صغيرة. يمكنك من خلال المعادلة 9.21 رؤية أن معامل حث الملف اللولبي يعتمد على الشكل الهندسي (الطول والمساحة وعدد اللفات) للملف فقط. يسري اعتماد معامل الحث هذا على الشكل الهندسي وحده لجميع الملفات العادية والملفات اللولبية، تماماً كما تعتمد سعة أي مكثف على شكله الهندسي فقط.

يتضمن أي ملف لولبي حثاً وعند استخدام الملف اللولبي في دائرة كهربائية، يطلق عليه محث، وذلك ببساطة لأن معامل الحث الخاص به يعد أهم خصائصه ما دام تدفق التيار يمثل أهمية.

9.7 الحث الذاتي والحث المتبادل

Self-Induction and Mutual Induction

فكر في الحالة التي يكون فيها ملفان، أو محثان، قريبين من بعضهما وينتج التيار المتغير المار في الملف الأول تدفقًا مغناطيسيًا في الملف الثاني. لكن، التيار المتغير في الملف الأول يستحث فرق جهد في ذلك الملف كذلك، ومن ثم يتغير المجال المغناطيسي الصادر من ذلك الملف كذلك. وتسمى هذه الظاهرة **الحث الذاتي**. ويطلق على فرق الجهد الناتج فرق جهد مستحث ذاتيًا. يستحث تغيير التيار في الملف الأول فرق جهد في الملف الثاني كذلك. وتسمى هذه الظاهرة **الحث المتبادل**.

وفق قانون فاراداي للحث، فإن فرق الجهد المستحث ذاتيًا لأي محث يحدد بواسطة المعادلة

$$(9.22) \quad \Delta V_{\text{ind},L} = - \frac{d(N\Phi_B)}{dt} = - \frac{d(Li)}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

حيث تتيح لنا المعادلة 9.18 التعويض بـ Li عن $N\Phi_B$. ومن ثم، يظهر فرق الجهد المستحث ذاتيًا في أي محث عندما يتغير التيار بمرور الزمن. ويعتمد فرق الجهد المستحث ذاتيًا على معدل تغير التيار مع الزمن ومعامل حث الملف.

يقدم قانون لنز اتجاه فرق الجهد المستحث ذاتيًا. تقدم إشارة السالب في المعادلة 9.22 الدليل على أن فرق الجهد المستحث يقاوم أي تغيير في التيار دومًا. على سبيل المثال، يوضح الشكل 9.22a التيار المتدفق عبر محث ويزداد مع الزمن. ومن ثم، فإن فرق الجهد المستحث ذاتيًا سوف يقاوم الزيادة في التيار. في الشكل 9.22b، يتناقص التيار المتدفق عبر محث بمرور الزمن. ومن ثم، فإن فرق الجهد المستحث ذاتيًا سيقاوم الانخفاض في التيار. لقد افترضنا أن هذه الحثات هي محثات نموذجية؛ بمعنى أنها لا تبدي أي مقاومة. تكشف جميع فروق الجهد المستحثة عن نفسها عبر توصيلات الحث. يتم تناول الحثات ذات المقاومة في القسم 9.8. فلنفكر الآن في ملفين متجاورين محوريهما المركزيين في وضع محاذاة (الشكل 9.23). يحتوي الملف 1 على عدد لفات N_1 والملف 2 على عدد لفات N_2 . ينتج التيار المار في الملف 1 مجالًا مغناطيسيًا \vec{B}_1 والتدفق الكلي في الملف 2 الناتجة عن المجال المغناطيسي في الملف 1 هي $N_2\Phi_{1\rightarrow 2}$. يُعرف معامل الحث المتبادل، $M_{1\rightarrow 2}$ ، للملف 2 الناتج عن الملف 1 على أنه

$$(9.23) \quad M_{1\rightarrow 2} = \frac{N_2\Phi_{1\rightarrow 2}}{i_1}$$

الشكل 9.23 يحتوي الملف 1 على تيار i_1 . يحتوي الملف 2 على فولتميتر قادر على قياس فرق الجهد المستحث الضئيل.

بضرب طرفي المعادلة 9.23 في i_1 نحصل على

$$i_1 M_{1\rightarrow 2} = N_2\Phi_{1\rightarrow 2}$$

إذا كان التيار في الملف 1 يتغير مع الزمن، فيمكننا كتابة

$$M_{1\rightarrow 2} \frac{di_1}{dt} = N_2 \frac{d\Phi_{1\rightarrow 2}}{dt}$$

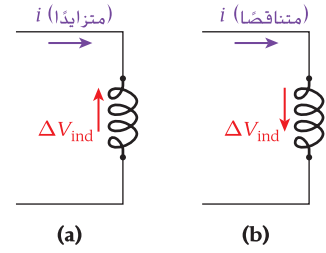
يشبه الجانب الأيمن من هذه المعادلة الجانب الأيمن من قانون فاراداي للحث (المعادلة 9.5). ومن ثم، يمكننا كتابة

$$(9.24) \quad \Delta V_{\text{ind},2} = -M_{1\rightarrow 2} \frac{di_1}{dt}$$

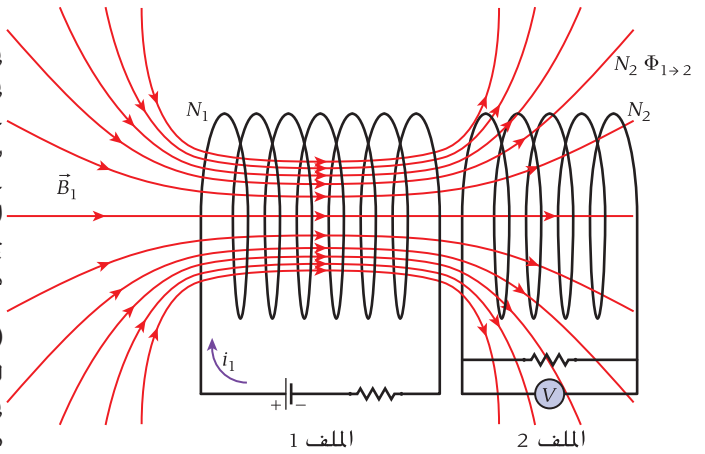
فلنعكس أدوار الملفين الآن (الشكل 9.24). ينتج التيار، i_2 ، في الملف 2 مجالًا مغناطيسيًا، \vec{B}_2 ، والتدفق الكلي في الملف 1 الناتجة عن المجال المغناطيسي في الملف 2 هي $N_1\Phi_{2\rightarrow 1}$. باستخدام التحليل نفسه الذي طبقناه لتحديد معامل الحث المتبادل للملف 2 الناتج عن الملف 1، نجد أن

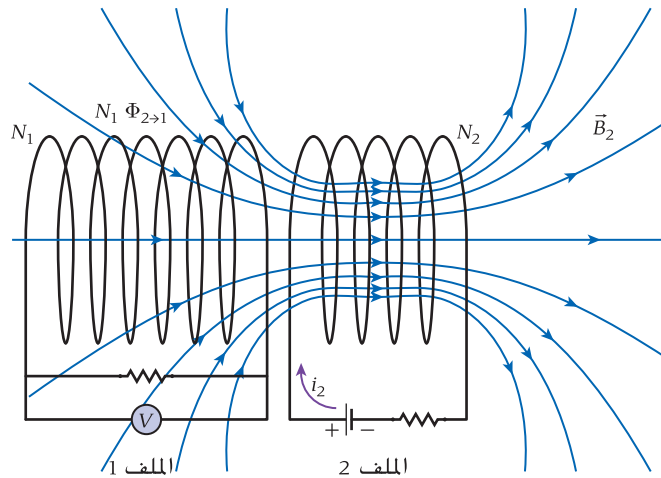
$$(9.25) \quad \Delta V_{\text{ind},1} = -M_{2\rightarrow 1} \frac{di_2}{dt}$$

حيث $M_{2\rightarrow 1}$ هو معامل الحث المتبادل للملف 1 الناتج عن الملف 2.



الشكل 9.22 (a) فرق جهد مستحث ذاتيًا في محث ما عندما يكون التيار متزايدًا. (b) فرق جهد مستحث ذاتيًا في محث ما عندما يكون التيار متناقصًا.





الشكل 9.24 يحتوي الملف 2 على تيار i_2 . يحتوي الملف 1 على فولتميتر قادر على قياس فرق الجهد المستحث الضئيل.

نرى أن فرق الجهد المستحث في ملف واحد يتناسب مع تغير التيار في الملف الآخر. ويكون ثابت التناسب هو معامل الحث المتبادل. إذا قمنا بتبديل الرقمين 1 و 2 وكررنا تحليل تأثير الملفين في بعضها بالكامل، فنرى أن

$$M_{1 \rightarrow 2} = M_{2 \rightarrow 1} = M$$

يمكننا عندئذٍ إعادة كتابة المعادلتين 9.24 و 9.25 على النحو

$$(9.26) \quad \Delta V_{\text{ind},2} = -M \frac{di_1}{dt}$$

$$(9.27) \quad \Delta V_{\text{ind},1} = -M \frac{di_2}{dt}$$

حيث M هو **معامل الحث المتبادل** بين الملفين. ووحدة قياسه في النظام الدولي هي الهنري. ثمة تطبيق رئيس للحث المتبادل في المحوِّلات، وقد تمت مناقشتها في الوحدة 10.

الحث المتبادل بين ملفين

مسألة محلولة 9.2

يوجد ملف لولبي طويل ذو مقطع عرضي دائري نصف قطره $r_1 = 2.80 \text{ cm}$ و $n = 90$ لفة/cm داخل ملف قصير يتضمن مقطعاً عرضياً دائرياً نصف قطره $r_2 = 4.90 \text{ cm}$ و $N = 31$ لفة ومتحد معه في المحور (الشكل 9.25a). يزداد التيار في الملف اللولبي بمعدل ثابت من الصفر إلى $i = 2.20 \text{ A}$ خلال فترة زمنية تبلغ 48.0 ms .

المسألة

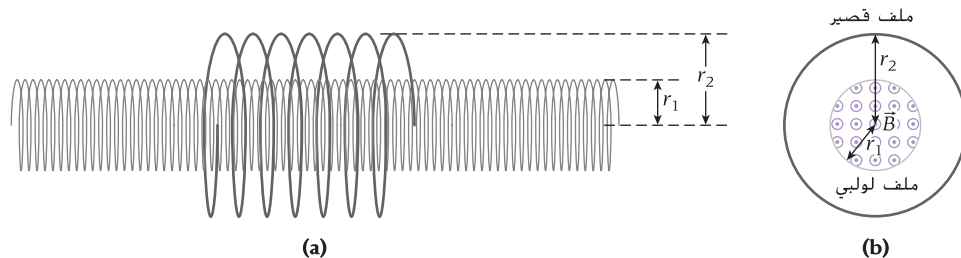
كم يبلغ فرق الجهد المستحث في الملف القصير عندما يتغير التيار؟

الحل

فكر فرق الجهد المستحث في الملف القصير ينتج عن تغير التيار المتدفق في الملف اللولبي. وفق المعادلة 9.23، فإن الحث المتبادل للملف القصير الناتج عن الملف اللولبي هو عدد لفات الملف

الشكل 9.25

(a) ملف لولبي طويل نصف قطره r_1 داخل ملف قصير نصف قطره r_2 . (b) مظهر الملفين كما يبدو من أسفل المحور المركزي.



القصور مضروباً في التدفق المغناطيسي للملف اللولبي، مقسوماً على التيار المتدفق في الملف اللولبي. بعد تحديد الحث المتبادل، يمكننا عندئذٍ حساب فرق الجهد المستحث في الملف القصير.

الرسم يوضح الشكل 9.25b منظرًا للملفين يبدوان أسفل محورهما المركزي.

ابحث يمكننا وضع صيغة لمعامل حث المتبادل بين الملف الصغير والملف اللولبي على النحو

$$(i) \quad M = \frac{N\Phi_{s \rightarrow c}}{i}$$

حيث N هو عدد اللفات في الملف القصير و $N\Phi_{s \rightarrow c}$ هو التدفق الكلي في الملف الناتجة عن المجال المغناطيسي للملف اللولبي و i هو التيار المار في الملف اللولبي. يمكن التعبير عن التدفق على النحو

$$(ii) \quad \Phi_{s \rightarrow c} = BA$$

حيث B مقدار المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي و A مساحة المقطع العرضي. تذكر من الوحدة 8 أنه بالنسبة إلى الملف اللولبي، فإن مقدار المجال المغناطيسي هو

$$B = \mu_0 ni$$

حيث n عدد اللفات لكل وحدة طول. مساحة المقطع العرضي للملف اللولبي هي

$$(iii) \quad A = \pi r_1^2$$

ويكون فرق الجهد المستحث في الملف القصير عندئذٍ هو

$$\Delta V_{\text{ind}} = -M \frac{di}{dt}$$

بسط يمكننا الجمع بين المعادلات (i) و(ii) و(iii) للحصول على معامل الحث المتبادل بين الملفين:

$$M = \frac{NBA}{i} = \frac{N(\mu_0 ni)(\pi r_1^2)}{i} = N\pi\mu_0 nr_1^2$$

عندئذٍ يكون فرق الجهد المستحث في الملف القصير هو

$$\Delta V_{\text{ind}} = -(N\pi\mu_0 nr_1^2) \frac{di}{dt}$$

احسب التغير في التيار ثابتًا، إذا

$$\frac{di}{dt} = \frac{2.20 \text{ A}}{48.0 \times 10^{-3} \text{ s}} = 45.8333 \text{ A/s}$$

يكون معامل الحث المتبادل بين الملفين هو

$$M = (31)\pi(4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A})(290 \times 10^2 \text{ m}^{-1})(2.80 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 0.0027825 \text{ H}$$

ويكون فرق الجهد المستحث في الملف القصير عندئذٍ هو

$$\Delta V_{\text{ind}} = -(0.0027825 \text{ H})(45.8333 \text{ A/s}) = -0.127531 \text{ V}$$

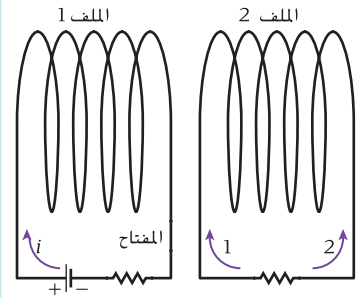
قرب نقرب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$\Delta V_{\text{ind}} = -0.128 \text{ V}$$

تحقق ثانية مقدار فرق الجهد المستحث في الملف الخارجي القصير هو 128 mV، وهو المقدار الذي يمكن الحصول عليه بتحريك ساق مغناطيسي قوي داخل ملف وخارجه. ومن ثَمَّ، تبدو النتيجة التي توصلنا إليها منطقية.

مراجعة المفاهيم 9.6

يوضح الشكل ملفين متطابقين. يمر تيار i في الملف 1 في الاتجاه الموضح. عند فتح المفتاح في دائرة الملف 1، ماذا يحدث في الملف 2؟



(a) يُستحث تيار في الملف 2 يتدفق في الاتجاه 1.

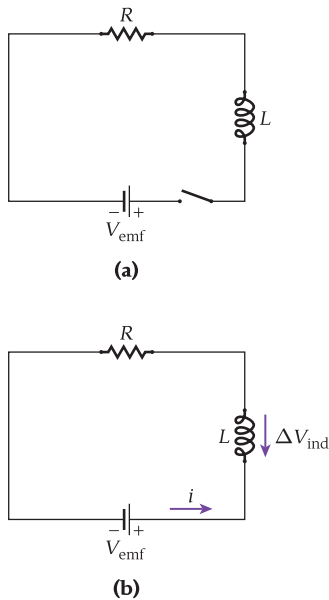
(b) يُستحث تيار في الملف 2 يتدفق في الاتجاه 2.

(c) لا يُستحث تيار في الملف 2.

9.8 دوائر الحث والمقاوم RL Circuits

في الوحدة 6، رأينا أنه إذا تم وضع مصدر قوة دافعة كهربائية ينتج جهد، V_{emf} ، داخل دائرة أحادية الحلقة تتضمن مقاومة R ومكثف سعته C ، فإن الشحنة، q ، الموجودة على المكثف تتراكم بمرور الزمن وفق

$$q = CV_{\text{emf}}(1 - e^{-t/\tau_{\text{RC}}})$$



الشكل 9.26 دائرة أحادية الحلقة بها

مصدر قوة دافعة كهربائية ومقاوم ومحث؛
(a) المفتاح مفتوح؛ (b) المفتاح مغلّق. عند
قفل المفتاح، يزداد التيار المار في الاتجاه
الموضح. ويستحث فرق جهد في الحث في
الاتجاه المعاكس، كما هو موضح.

حيث إن الثابت الزمني للدائرة، $\tau_{RC} = RC$ ، هو ناتج ضرب المقاومة والسعة. ويتحكم الثابت الزمني نفسه في انخفاض الشحنة الأولية، q_0 ، على المكثف إذا تمت إزالة مصدر القوة الدافعة الكهربائية فجأة وأصبحت الدائرة دائرة قصر:

$$q = q_0 e^{-t/\tau_{RC}}$$

إذا تم وضع مصدر القوة الدافعة الكهربائية في دائرة أحادية الحلقة تحتوي على مقاوم مقاومته R ومحث معامل حثه L ، تسمى **دائرة الحث والمقاوم (RL)**، فستحدث ظاهرة مماثلة. يوضح الشكل 9.26 دائرة يتم فيها توصيل مصدر القوة الدافعة الكهربائية بمقاوم ومحث على التوالي. إذا تضمنت الدارة المقاوم فقط دون الحث، فسيزداد التيار على الفور تقريبًا إلى القيمة التي يحددها قانون أوم، $i = V_{emf}/R$ ، بمجرد إغلاق المفتاح. لكن، في الدائرة التي تتضمن المقاوم والحث معًا، يولد التيار المتزايد المتدفق عبر الحث فرق جهد مستحثًا ذاتيًا يميل إلى مقاومة الزيادة في التيار. ومع مرور الزمن، ينخفض التغير في التيار، وينخفض كذلك فرق الجهد المقاوم المستحث ذاتيًا. وبعد فترة طويلة، يصبح التيار ثابتًا عند القيمة V_{emf}/R .

يمكننا استخدام قانون الحث لكيرشوف لتحليل هذه الدائرة، مع افتراض أن التيار، i ، يتدفق في أي وقت عبر الدائرة في اتجاه عكس عقارب الساعة. مع تدفق التيار عكس عقارب الساعة حول الدائرة، يوفر مصدر القوة الدافعة الكهربائية زيادة في الجهد، $+V_{emf}$ ، ويسبب المقاوم انخفاضًا في الجهد، $-iR$. ينتج الحث الذاتي للمحث انخفاضًا في الجهد لأنه يقاوم الزيادة في التيار. يتناسب الانخفاض في الجهد الناتج عن الحث مع معدل تغير التيار مع الزمن، كما تحدده المعادلة 9.22. ومن ثم، يمكننا كتابة مجموع انخفاضات الجهد حول الدائرة على النحو

$$V_{emf} - iR - L \frac{di}{dt} = 0$$

يمكننا إعادة كتابة هذه المعادلة على النحو

$$L \frac{di}{dt} + iR = V_{emf} \quad (9.28)$$

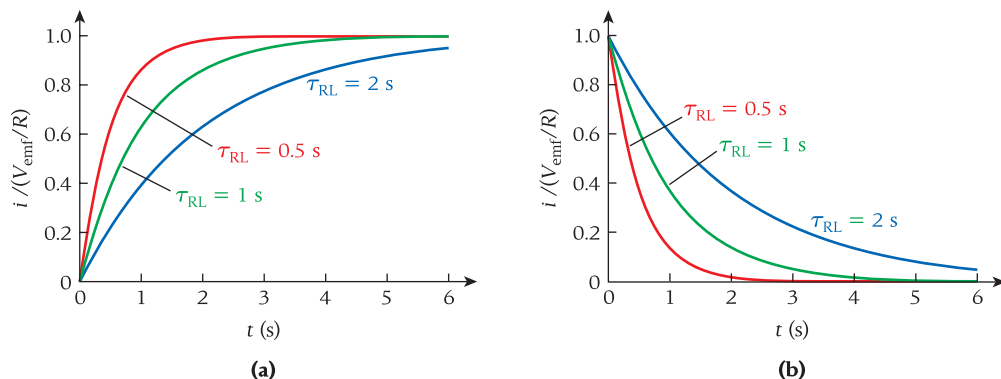
يتم التوصل إلى حل هذه المعادلة التفاضلية بالطريقة نفسها التي تم بها التوصل إلى حل المعادلة التفاضلية لدائرة المقاوم والمكثف (RC) في الوحدة 6. الحل، الذي يمكن التحقق منه بالتعويض به في المعادلة 9.28 هو

$$i(t) = \frac{V_{emf}}{R} (1 - e^{-t/(L/R)}) \quad (9.29)$$

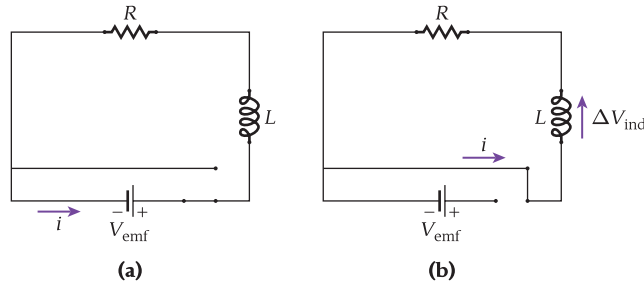
الكمية L/R هي الثابت الزمني لدائرة الحث والمقاوم (RL):

$$\tau_{RL} = \frac{L}{R} \quad (9.30)$$

يوضح الشكل 9.27a هذه العلاقة الزمنية للتيار في دائرة الحث والمقاوم (RL) لثلاث قيم مختلفة للثابت الزمني.



الشكل 9.27 تغير التيار المتدفق عبر دائرة الحث والمقاوم (RL) بتغير الزمن. (a) التيار في صورة دالة للزمن عند اتصال مقاوم ومحث ومصدر قوة دافعة كهربائية على التوالي. (b) التيار في صورة دالة للزمن عند إزالة مصدر القوة الدافعة الكهربائية فجأة من دائرة الحث والمقاوم (RL) بعدما ظل متصلًا لفترة طويلة.



الشكل 9.28 دائرة أحادية الحلقة بها مصدر قوة دافعة كهربائية ومقاوم وملف حث. (a) الدائرة مع توصيل مصدر القوة الدافعة. يتدفق التيار في الاتجاه الموضح. (b) تمت إزالة مصدر القوة الدافعة الكهربائية وتوصيل المقاوم والحث. يمر التيار في الاتجاه السابق نفسه ولكنه يتناقص. ويُسَحث فرق جهد في الحث في اتجاه التيار ذاته، كما هو موضح.

بالنظر إلى المعادلة 9.9، يتضح لنا أنه بالنسبة إلى $t = 0$ ، يكون التيار مساوياً للصفر. بالنسبة إلى $t \rightarrow \infty$ ، يتم تحديد التيار بواسطة $i = V_{emf}/R$ ، كما كان متوقعاً.

فكر الآن في الدائرة الموضحة في الشكل 9.28، التي تم فيها توصيل مصدر القوة الدافعة الكهربائية أولاً ثم إزالته فجأة. يمكننا استخدام المعادلة 9.28 حيث $V_{emf} = 0$ لوصف الاعتماد الزمني لهذه الدائرة:

$$(9.31) \quad L \frac{di}{dt} + iR = 0$$

بسبب المقاوم انخفاضاً في الجهد ويتضمن الحث فرق جهد مستحثاً ذاتياً يميل إلى مقاومة الانخفاض في التيار. حل المعادلة 9.31 هو

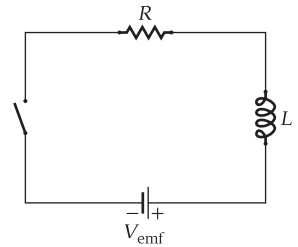
$$(9.32) \quad i(t) = i_0 e^{-t/\tau_{RL}}$$

يمكن استخدام الشروط الأولية عندما يكون مصدر القوة الدافعة الكهربائية متصلًا لتحديد التيار الأولي: $i_0 = V_{emf}/R$. تصف المعادلة 9.32 دائرة أحادية الحلقة بمقاوم ومحث تتضمن تياراً أولياً i_0 . ينخفض التيار أسياً بمرور الزمن بثابت زمني $\tau_{RL} = L/R$ ، وبعد فترة طويلة يكون التيار في الدائرة يساوي صفراً. يتضمن الشكل 9.27b تمثيلاً للتيار المار في دائرة الحث والمقاوم (RL) هذه كدالة زمن لثلاث قيم مختلفة للثابت الزمني.

يمكن استخدام دوائر الحث والمقاوم (RL) كمؤقتات لتشغيل الأجهزة على فترات زمنية محددة ويمكن استخدامها كذلك للتخلص من الضوضاء. لكن، عادةً ما تتم معالجة هذه التطبيقات باستخدام دوائر مقاوم ومكثف (RC) ماثلة نظراً إلى توافر المكثفات الصغيرة بنطاق من السعات أكبر من نطاق توافر الحثات. تصبح القيمة الفعلية للمحثات جلية في الدوائر التي تتضمن المكونات الثلاثة جميعاً، المقاومات والمكثفات والحثات، التي تم تناولها في الوحدة 10.

مراجعة المفاهيم 9.7

فكر في دائرة الحث والمقاوم (RL) الموضحة في الشكل. عند قفل المفتاح، يرتفع التيار المار في الدارة أسياً إلى القيمة $i = V_{emf}/R$. إذا تم استبدال الحث في هذه الدائرة بمحث به ثلاثة أمثال عدد اللفات لكل وحدة طول، فإن الزمن اللازم للوصول إلى تيار مقداره $0.9i$



(a) يزداد.

(b) يقل.

(c) يظل كما هو.

الشغل المبذول بواسطة بطارية

مسألة محلولة 9.3

تحتوي دائرة التوالي على بطارية تنتج $V_{emf} = 40.0 \text{ V}$ ومحث معامل حثه $L = 2.20 \text{ H}$ ومقاوم مقاومته $R = 160.0 \Omega$ ومفتاح. متصلين كما هو موضح في الشكل 9.9.

المسألة

يتم إغلاق المفتاح عند الزمن $t = 0$. ما مقدار الشغل الذي تبذله البطارية بين $t = 0$ و $t = 1.65 \times 10^{-2} \text{ s}$ ؟

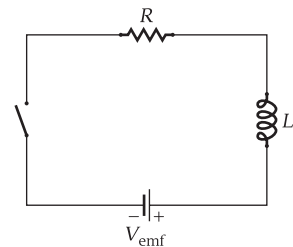
الحل

فكر عندما يكون المفتاح مغلقاً، يبدأ التيار بالتدفق وتقوم البطارية بتوريد الطاقة. تُعرف القدرة بأنها الجهد مضروباً في التيار في أي زمن معين. والشغل هو تكامل القدرة على الزمن الذي كانت الدائرة تعمل خلاله.

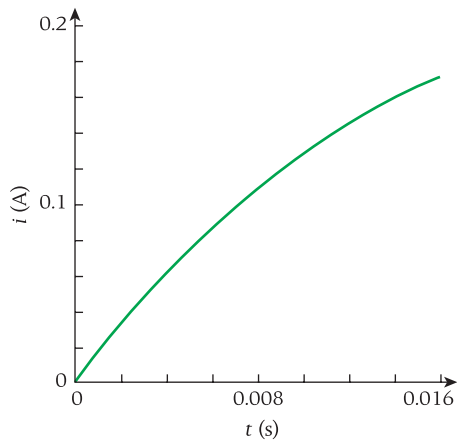
ارسم يوضح الشكل 9.30 مخططاً للتيار في دائرة الحث والمقاوم (RL) كدالة زمن.

ابحث يتم تحديد القدرة في الدائرة في أي زمن t بعد غلق المفتاح بواسطة

$$(i) \quad P(t) = V_{emf} i(t)$$



الشكل 9.29 دائرة الحث والمقاوم (RL) بها مفتاح.



الشكل 9.30 التيار المار في دائرة الحث والمتاوم (RL) في صورة دالة للزمن.

حيث $i(t)$ التيار المار في الدائرة. يُحدد التيار كدالة زمن لهذه الدائرة من المعادلة 9.9.

$$(ii) \quad i(t) = \frac{V_{emf}}{R} (1 - e^{-t/\tau_{RL}})$$

حيث $\tau_{RL} = L/R$ الشغل الذي تبذله البطارية هو تكامل القدرة على الزمن الذي كانت الدائرة تعمل خلاله:

$$(iii) \quad W = \int_0^T P(t) dt$$

حيث T هو الزمن بعد غلق المفتاح.

بسط يمكننا دمج المعادلات (i) و(ii) و(iii) لنحصل على

$$W = \int_0^T \frac{V_{emf}^2}{R} (1 - e^{-t/\tau_{RL}}) dt$$

بتقييم التكامل المحدد نحصل على

$$(iv) \quad W = \frac{V_{emf}^2}{R} [t + \tau_{RL} e^{-t/\tau_{RL}}]_0^T = \frac{V_{emf}^2}{R} [T + \tau_{RL} (e^{-T/\tau_{RL}} - 1)]$$

احسب أولاً، نحسب قيمة الثابت الزمني:

$$\tau_{RL} = \frac{L}{R} = \frac{2.20 \text{ H}}{160.0 \Omega} = 1.375 \times 10^{-2} \text{ s}$$

نعوض بجميع القيم العددية في المعادلة (iv) لنحصل على

$$W = \frac{(40.0 \text{ V})^2}{160.0 \Omega} \left[(1.65 \times 10^{-2} \text{ s}) + (1.375 \times 10^{-2} \text{ s}) \left(e^{-(1.65 \times 10^{-2} \text{ s})/(1.375 \times 10^{-2} \text{ s})} - 1 \right) \right] = 0.0689142 \text{ J}$$

قرب نغرب النتيجة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$W = 6.89 \times 10^{-2} \text{ J}$$

تحقق ثانية للتحقق ثانياً من النتيجة، نفترض أن التيار المار في الدائرة ثابت مع الزمن ويساوي نصف التيار النهائي:

$$i_{ave} = \frac{i(T)}{2} = \frac{(V_{emf}/R)(1 - e^{-T/\tau_{RL}})}{2} = \frac{(40.0 \text{ V}/160.0 \Omega)(1 - e^{-(1.65 \times 10^{-2} \text{ s})/(1.375 \times 10^{-2} \text{ s})})}{2} = 0.0874 \text{ A}$$

سيتطابق هذا التيار مع متوسط التيار إذا زاد التيار خطياً مع الزمن. عندئذٍ يكون الشغل المبذول هو

$$W = PT = i_{ave} V_{emf} T = (0.0874 \text{ A})(40.0 \text{ V})(1.65 \times 10^{-2} \text{ s}) = 5.77 \times 10^{-2} \text{ J}$$

هذه القيمة أقل من النتيجة المحسوبة، إلا أنها قريبة منها. ومن ثَمَّ، تبدو النتيجة التي توصلنا إليها منطقية.

9.9 الطاقة وكثافة الطاقة لـ مجال مغناطيسي

Energy and Energy Density of a Magnetic Field

يمكننا التفكير في محث كجهاز يمكنه تخزين الطاقة في مجال مغناطيسي، مثل الطريقة التي يتبعها المكثف لتخزين الطاقة في مجال كهربائي. يمكن تحديد الطاقة المخزنة في المجال الكهربائي لمكثف بواسطة

$$U_E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

تخيل محثاً متصلاً بمصدر قوة دافعة كهربائية. يبدأ التيار بالتدفق عبر الحث، منتجاً فرق جهد مستحثاً ذاتياً يقاوم الزيادة في التيار. تُعد القدرة اللحظية التي يوفرها مصدر القوة الدافعة الكهربائية هي ناتج ضرب التيار والجهد الخاص بمصدر القوة الدافعة الكهربائية V_{emf} . باستخدام المعادلة 9.28 حيث $R = 0$ ، يمكننا كتابة

$$(9.33) \quad P = V_{emf} i = \left(L \frac{di}{dt} \right) i$$

بدمج هذه القدرة على الزمن الذي تستغرقه للوصول إلى تيار نهائي i في الدائرة، نحصل على الطاقة التي يوفرها مصدر القوة الدافعة الكهربائية. ونظرًا لعدم وجود أي فقد في المقاومة في هذه الدائرة، فيجب تخزين هذه القدرة من المجال المغناطيسي للمحث. ومن ثم،

$$(9.34) \quad U_B = \int_0^t P dt = \int_0^i Li' di = \frac{1}{2} Li^2$$

تتميز المعادلة 9.34 بهيئة تشبه المعادلة المماثلة للمجال الكهربائي الخاص بمكثف، مع استبدال q بـ i و $1/C$ بـ L .

فلنفكر الآن في ملف لولبي نموذجي طوله ℓ ومساحة مقطعه العرضي A وعدد لفات n لكل وحدة طول، يحمل تيارًا i . تكون الطاقة المخزنة في المجال المغناطيسي للملف اللولبي وفق المعادلة 9.21 هي

$$U_B = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 \ell A i^2$$

يشغل المجال المغناطيسي الحجم الذي يتضمنه الملف اللولبي، والذي يمكن تحديده بواسطة ℓA . ومن ثم، تكون كثافة الطاقة، u_B ، للمجال المغناطيسي للملف اللولبي هي

$$u_B = \frac{\frac{1}{2} \mu_0 n^2 \ell A i^2}{\ell A} = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 i^2$$

حيث إن $B = \mu_0 n i$ للملف اللولبي، فيمكن التعبير عن كثافة طاقة المجال المغناطيسي لملف لولبي على النحو

$$(9.35) \quad u_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

على الرغم من أننا اشتقنا هذه المعادلة للحالة الخاصة للملف اللولبي، فإنها تنطبق على المجالات المغناطيسية عمومًا.

مراجعة المفاهيم 9.8

ملف لولبي طويل ذو مقطع عرضي دائري نصف قطره $r = 8.10 \text{ cm}$ وطوله $\ell = 0.540 \text{ m}$ ، وعدد لفاته $n = 2.00 \times 10^4$ لفة m^{-1} . يختزن الملف اللولبي طاقة قدرها 42.5 mJ عندما يحمل تيارًا i . فإذا تضاعف التيار إلى $2i$ ، فإن الطاقة المخزنة في الملف اللولبي

- تقل بمعامل قدره 4
- تقل بمعامل قدره 2
- تظل كما هي.
- تزداد بمعامل قدره 2
- تزداد بمعامل قدره 4

9.10 تطبيقات على تكنولوجيا المعلومات Applications to Information Technology

تستخدم أجهزة الحاسوب والعديد من الأجهزة الإلكترونية للمستهلكين التمكن من تخزين المعلومات واستردادها. ومن الأمثلة على ذلك محركات الأقراص الثابتة للحاسوب وأشرطة الفيديو والأشرطة الصوتية والأشرطة المغناطيسية على بطاقات الائتمان. خلال العقد الماضي، ازداد استخدام وسائط التخزين المستندة إلى تقنيات أخرى، مثل التخزين البصري للمعلومات على أقراص CD وأقراص DVD وبطاقات الذاكرة فلاش في الكاميرات الرقمية، لكن، لا تزال أجهزة التخزين المغناطيسية الدعامة التكنولوجية الأساسية وأساس صناعة تقدر بـ مليارات الدولارات.

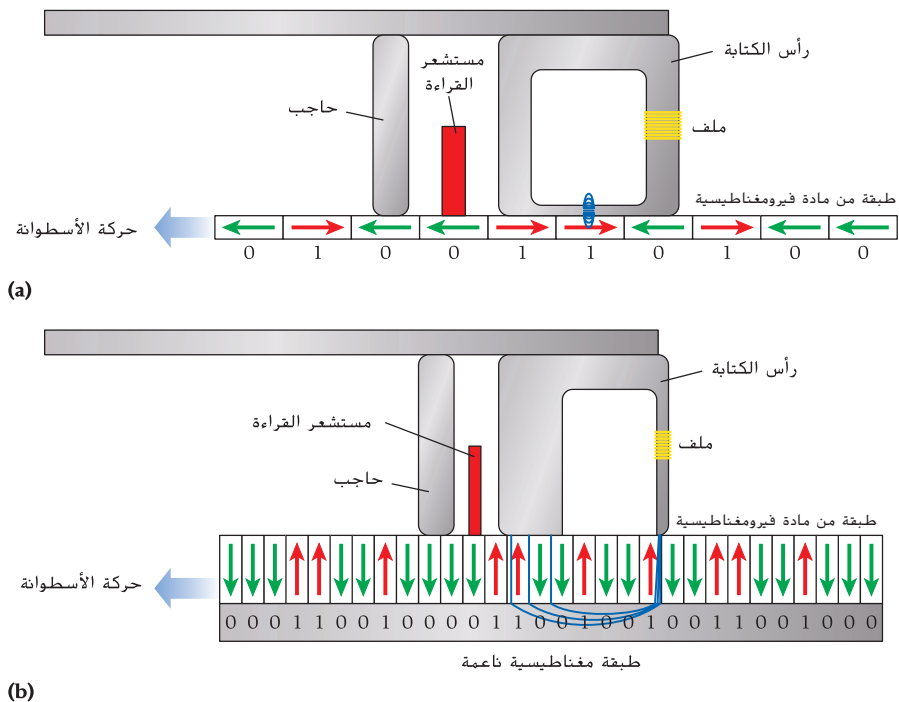
محرك الأقراص الثابتة في الحاسوب

محرك الأقراص الثابتة في الحاسوب هو جهاز يخزن المعلومات باستخدام التمكن والحث. يُخزن محرك الأقراص الثابتة المعلومات في هيئة وحدات بت، الرمز الثنائي الذي يتألف من صفر وواحد. تكون ثنائي وحدات بت وحدة بايت، التي يمكن أن تمثل رقمًا أو رمزًا أبجديًا رقميًا. يمكن لحرك الأقراص الثابتة الحديث استيعاب حتى 2×10^{12} تيرابايت (بايت) من المعلومات. يتكون محرك الأقراص الثابتة من أسطوانة دوارة واحدة أو أكثر ذات طبقة من مادة فيرومغناطيسية يمكن الوصول إليها بواسطة رأس متحرك للقراءة/الكتابة، كما هو موضح في الشكل 9.31.



الشكل 9.31 رأس القراءة/الكتابة وأسطوانة دوران داخل محرك القرص الصلب بالكمبيوتر.

يمكن وضع رأس القراءة/الكتابة في موضعه للوصول إلى أي من المسارات المتعددة على الأسطوانة الدوارة. يوضح الشكل 9.32a عمل رأس القراءة/الكتابة في محرك أقراص ثابتة تقليدي. عند تحرك الأسطوانة المغطاة أسفل رأس القراءة/الكتابة، تعمل نبضة من التيار تمر في اتجاه واحد على مغنطة سطح الأسطوانة لتمثيل واحد ثنائي، أو تعمل نبضة من التيار تمر في الاتجاه المعاكس على مغنطة السطح لتمثيل صفر ثنائي. في الشكل 9.32a، يظهر واحد ثنائي على شكل سهم أحمر يشير إلى اليمين، ويظهر صفر ثنائي على شكل سهم أخضر يشير إلى اليسار. في وضع القراءة، عندما تمر المناطق المغنطة للأسطوانة أسفل مستشعر القراءة، يُستحث تيارٌ موجبٌ أو سالبٌ، ويمكن للأجزاء الإلكترونية في محرك الأقراص الثابتة توضيح ما إذا كانت المعلومات صفرًا أو واحدًا. تُسمى الطريقة المستخدمة لترميز البيانات الموضحة في الشكل 9.32a وإعادة قراءتها الترميز الطولي لأن المجالات المغناطيسية للمناطق المغنطة في الأسطوانة تكون موازية لحركة الأسطوانة أو موازية لها وفي اتجاه مضاد. تمت زيادة سعة تخزين البيانات لمحركات الأقراص الثابتة من خلال



الشكل 9.32 رأس القراءة/الكتابة لحرك القرص الصلب بالكمبيوتر. (a) تشفير طولاني للمعلومات في أسطوانة الدوران. (b) تشفير عمودي للمعلومات في أسطوانة الدوران.

جعل المساحات الممغنطة أصغر وإضافة المزيد من الأسطوانات ورؤوس القراءة/الكتابة. لكن، وجدت الشركات المصنعة أنه من الصعب إنشاء محركات أقراص ثابتة تستوعب أكثر من 250 جيجابايت (250×10^9 بايت) باستخدام هذه التقنية. وعندما قامت الشركات المصنعة بتصغير وحدات البت، تداخلت وحدات البت مع بعضها، ما تسبب في تبديل عشوائي لوحدة البت وحدوث أخطاء في البيانات المخزنة.

ومؤخرًا، تم تطوير تقنية الترميز المتعامد للبيانات، كما هو موضح في الشكل 9.32b. مرة أخرى، يستخدم رأس القراءة/الكتابة فوق أسطوانة دوارة مغطاة بمادة فيرومغناطيسية. لكن، في هذه الحالة تكون المجالات المغناطيسية متعامدة على سطح الأسطوانة، ما يتيح تعبئة أضييق لوحدة البت ويزيد سعة محرك الأقراص الثابتة. يتم إنشاء الأسطوانة باستخدام طبقة من مادة فيرومغناطيسية أكثر سمكًا ومادة مغناطيسية ناعمة على الجزء السفلي تعمل على احتواء خطوط المجال المغناطيسي. لاحظ أن خطوط المجال المغناطيسي في الطرف المدب لرأس الكتابة قريبة جدًا من بعضها، بينما خطوط المجال المغناطيسي العائدة إلى الطرف غير الحاد لرأس الكتابة متباعدة جدًا. ومن ثم، تكون الطبقة الفرومغناطيسية للأسطوانة ممغنطة بقوة في أحد الاتجاهين إلى أعلى أو إلى أسفل، وفق اتجاه نبضة التيار عبر ملف رأس الكتابة، بينما لا تتأثر وحدات البت القريبة من مستشعر القراءة.

تتضمن محركات الأقراص الثابتة التي تستخدم الترميز العمودي كذلك الظاهرة المسماة *المقاومة المغناطيسية الكبرى (GMR)*، التي تسمح بإنشاء مستشعر قراءة صغير جدًا وحساس للغاية. حصل الفيزيائيان الفرنسي ألبرت فير والألماني بيتر غرونبرغ على جائزة نوبل في الفيزياء عام 2007 لاكتشافهما هذا التأثير. تتوافر محركات الأقراص الثابتة بسعات تخزين معلومات تصل إلى 2 تيرابايت أو أكثر تستخدم الترميز المتعامد ومستشعرات القراءة بتأثير المقاومة المغناطيسية الكبرى على نطاق واسع. وتعد أجهزة iPod ذات سعة تخزين أعلى من 64 جيجابايت مثالًا على جهاز يستخدم هذه التقنية (يستخدم iPod Touch و أجهزة iPhone تقنية تخزين مختلفة لا تتضمن أجزاء متحركة). وتعد حقيقة أنه يمكنك مشاهدة أفلام كاملة على جهاز iPod الخاص بك وحمل آلاف الأغاني عليه كذلك نتيجة مباشرة لأبحاث الفيزياء التي أجريت خلال العقدين الماضيين. ومع استمرار توصيل الأبحاث في علوم النانو وتكنولوجيا النانو إلى نتائج مثيرة للتطبيقات التكنولوجية، سيتواصل النمو المذهل في إمكانات الأجهزة الإلكترونية للمستهلكين خلال المستقبل القريب.

ما تعلمناه | دليل الدراسة للاختبار

- وفق قانون فاراداي للحث، يتم تحديد فرق الجهد المستحث ΔV_{ind} ، في حلقة توصيل من خلال سالب المعدل الزمني لتغير التدفق المغناطيسي المار عبر الحلقة: $\Delta V_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$
- يمكن تحديد التدفق المغناطيسي، Φ_B ، بواسطة $\Phi_B = \iint \vec{B} \cdot d\vec{A}$ حيث \vec{B} المجال المغناطيسي و $d\vec{A}$ عنصر المساحة التفاضلي المحدد بواسطة متجه عمودي على السطح الذي يمر المجال المغناطيسي خلاله.
- بالنسبة إلى مجال مغناطيسي ثابت، \vec{B} يتم تحديد التدفق المغناطيسي Φ_B ، المار عبر مساحة، A ، بواسطة $\Phi_B = BA \cos \theta$ ، حيث θ الزاوية بين متجه المجال المغناطيسي والمتجه العمودي على المساحة.
- ينص قانون لنز على أن التدفق المغناطيسي المتغير عبر حلقة موصلة يستحث تيارًا في الحلقة يقاوم التغيير في التدفق المغناطيسي.
- يستحث المجال المغناطيسي المتغير مع الزمن مجالًا كهربائيًا يتم تحديده بواسطة $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ حيث يتم التكامل على أي مسار مغلق في المجال المغناطيسي.
- معامل الحث، L ، الملف يتضمن عدد من اللفات هو التدفق الكلي (ناج ضرب عدد اللفات، N ، والتدفق المغناطيسي، Φ_B) مقسومة على التيار، i : $L = \frac{N\Phi_B}{i}$
- يتم تحديد معامل الحث للملف لولبي بواسطة $L = \mu_0 n^2 \ell A$ ، حيث n عدد اللفات لكل وحدة طول و ℓ طول الملف اللولبي و A مساحة المقطع العرضي للملف اللولبي.
- يتم تحديد فرق الجهد المستحث ذاتيًا، $\Delta V_{\text{ind},L}$ ، لأي محث بواسطة $\Delta V_{\text{ind},L} = -L \frac{di}{dt}$ حيث L هو معامل حث الملف و $\frac{di}{dt}$ معدل تغير التيار المتدفق عبر الحث مع الزمن.
- تمتلك دائرة أحادية الحلقة فيها ملف معامل حثه L ومقاومة R ثابتًا زمنيًا مميزًا هو $\tau_{\text{RL}} = \frac{L}{R}$
- تحدد الطاقة، U_B ، المخزنة في المجال المغناطيسي لحث معامل حثه L ويحمل تيار i بالمعادلة $U_B = \frac{1}{2} Li^2$

إجابات أسئلة الاختبار الذاتي

- المغناطيسي، ينخفض التدفق المغناطيسي. وسيكون التيار المستحث في الحلقة في اتجاه عقارب الساعة لمقاومة الانخفاض في التدفق.
- 9.3** إذا كان فرق الجهد المستحث مساويًا للتغير في التدفق المغناطيسي، فإن أي زيادة في التدفق المار عبر الملف (ربما بسبب تقلب عشوائي لمدة قصيرة في المجال المغناطيسي المحيط في الغرفة) ستؤدي إلى فرق جهد مستحث، الأمر الذي سيولد تيارًا في الملف سيعمل على زيادة التدفق الذي سيؤدي إلى فرق جهد مستحث أكبر وتيار أكبر وزيادة أكبر في التدفق. بمعنى آخر، ستنشأ عن ذلك حالة من الانفلات، وهو أمر يخالف قانون حفظ الطاقة تمامًا.
- 9.4** (a) صواب (b) خطأ (c) صواب (d) صواب

$$\frac{dB}{dt} = -\frac{0.500 \text{ T}}{0.250 \text{ s}} = -2.00 \text{ T/s} \quad 9.1$$

$$\Delta V_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d(BA)}{dt} = -\pi r^2 \frac{dB}{dt}$$

$$r = \sqrt{\frac{|\Delta V_{\text{ind}}|}{\pi |dB/dt|}} = \sqrt{\frac{1.24 \text{ V}}{\pi (2.00 \text{ T/s})}} = 0.444 \text{ m}$$

- 9.2** عندما تدخل الحلقة المجال المغناطيسي، يزداد التدفق المغناطيسي. وسيكون التيار المستحث في الحلقة عكس اتجاه عقارب الساعة لمقاومة الزيادة في التدفق. عند خروج الحلقة من المجال

إرشادات حل المسائل

- 2.** بمجرد معرفة عناصر حالة المسألة الثابتة والمتغيرة، استخدم قانون لنز لتحديد اتجاه التيار المستحث ومواقع الجهدين الأعلى والأقل. ومن ثم، يمكنك اختيار اتجاه لمتجه المساحة التفاضلية، $d\vec{A}$ ، للتدفق وحساب الكميات غير المعروفة.

- 1.** حل مسألة تتضمن الحث الكهرومغناطيسي، اسأل أولاً: ما الذي يحدث تغيرًا في التدفق المغناطيسي؟ إذا كان المجال المغناطيسي متغيرًا، فعليك استخدام المعادلة 9.9؛ وإذا كانت المساحة التي يمر خلالها التدفق متغيرة، فعليك استخدام المعادلة 9.10؛ وإذا كان الاتجاه بين المجال المغناطيسي والمساحة متغيرًا، فعليك استخدام المعادلة 9.11. لسبب حاجة إلى حفظ هذه المعادلات، ما دمت تتذكر قانون فاراداي (المعادلة 9.5) وتعريف التدفق المغناطيسي (المعادلة 9.1).

أسئلة الاختيار من متعدد

(b) يكون فرق الجهد المستحث في الحلقة عند قيمته القصوى عند وجود ربع الحلقة في منطقة المجال المغناطيسي.

(c) يكون فرق الجهد المستحث في الحلقة عند قيمته القصوى عند دخول نصف الحلقة منطقة المجال المغناطيسي.

(d) يكون فرق الجهد المستحث في الحلقة ثابتًا من لحظة بدء الحلقة دخول منطقة المجال المغناطيسي.

9.7 أي من العبارات التالية بشأن الحث الذاتي صحيحة؟

(a) لا يحدث الحث الذاتي إلا عند تدفق تيار مستمر عبر دائرة.

(b) لا يحدث الحث الذاتي إلا عند تدفق تيار متردد عبر دائرة.

(c) يحدث الحث الذاتي عند تدفق تيار مستمر أو تيار متردد عبر دائرة.

(d) يحدث الحث الذاتي عند تدفق تيار مستمر أو تيار متردد عبر دائرة ما دام التيار متغيرًا.

9.8 لديك مصباح كهربائي وساق مغناطيسي وبكرة من الأسلاك يمكنك تقطيعها إلى أي عدد قطع تريد، ولا شيء آخر. كيف يمكنك إضاءة المصباح؟

(a) لا يمكنك ذلك. لأن المصباح بحاجة إلى كهرباء لإضاءته، ليس إلى مغناطيسية.

(b) اقطع قطعة من السلك وصل المصباح بطرفي السلك ومرر المغناطيس عبر الحلقة التي تكونت.

(c) اقطع قطعتين من السلك وصل المغناطيس والمصباح على التوالي.

9.9 احسب فرق الجهد المستحث بين طرفي جناحي طائرة بوينغ 400-747

يبلغ باع جناحيها 64.67 m عندما تكون في مستوى الطيران بسرعة 913 km/h.

افترض أن مقدار مركبة المتجه إلى أسفل للمجال المغناطيسي للأرض هو

$$B = 5.00 \times 10^{-5} \text{ T}$$

(a) 0.820 V (b) 2.95 V (c) 10.4 V (d) 30.1 V (e) 225 V

9.10 يوجد ملف لولبي طويل ذو مقطع عرضي دائري نصف قطره $r_1 = 2.80 \text{ cm}$

و $n = 90$ لفة/cm داخل ملف قصير ذي مقطع عرضي دائري نصف قطره

$r_2 = 4.90 \text{ cm}$ و $N = 31$ لفة ومتحد معه في المحور. افترض أن التيار المار في الملف

القصير يزداد بثبات من الصفر إلى $i = 2.80 \text{ A}$ في $t = 18.0 \text{ ms}$. كم يبلغ مقدار فرق

الجهد المستحث في الملف اللولبي عندما يتغير التيار المار في الملف القصير؟

(a) 0.0991 V (b) 0.128 V (c) 0.233 V (d) 0.433 V (e) 0.750 V

9.11 ملف لولبي طويل ذو مقطع عرضي دائري نصف قطره $r = 8.10 \text{ cm}$

وطوله $\ell = 0.540 \text{ m}$ و $n = 2.00 \times 10^4$ لفة/m. يحمل الملف اللولبي تيارًا قدره

$i = 4.04 \times 10^{-3} \text{ A}$. ما مقدار الطاقة المخزنة في المجال المغناطيسي لل ملف اللولبي؟

(a) $2.11 \times 10^{-7} \text{ J}$ (b) $8.91 \times 10^{-6} \text{ J}$ (c) $4.57 \times 10^{-5} \text{ J}$ (d) $6.66 \times 10^{-3} \text{ J}$ (e) $4.55 \times 10^{-1} \text{ J}$

9.12 افترض أن التيار المار في الملف القصير في المسألة المحلولة 9.2 يزداد بثبات من

الصفر إلى $i = 2.80 \text{ A}$ في $t = 18.0 \text{ ms}$. كم يبلغ مقدار فرق الجهد المستحث في الملف

اللولبي عندما يتغير التيار المار في الملف القصير؟

(a) 0.0991 V (b) 0.128 V (c) 0.233 V (d) 0.433 V (e) 0.750 V

9.13 افترض أن طول القضيب الدوار في المسألة المحلولة 9.1 يزيد بمعامل قدره 2.

ما معامل تغير القدرة المبذولة في المقاوم؟

(a) $\frac{1}{2}$ (b) $\frac{2}{3}$ (c) 4 (d) 8 (e) 16

9.14 افترض أن مقاومة المقاوم في المسألة المحلولة 9.1 تزيد بمعامل قدره 2.

ما معامل تغير القدرة المبذولة في المقاوم؟

(a) $\frac{1}{2}$ (b) $\frac{2}{3}$ (c) 4 (d) 8 (e) 16

9.1 ملف لولبي عدد لفاته 200 ومساحة مقطعه العرضي 60 cm^2 يتضمن مجالًا مغناطيسيًا يبلغ 0.60 T على طول محوره. إذا كان المجال محتجزًا داخل الملف اللولبي ويتغير بمعدل 0.20 T/s ، فسيبلغ مقدار فرق الجهد المستحث في الملف اللولبي

(a) 0.0020 V (b) 0.02 V (c) 0.001 V (d) 0.24 V

9.2 تُسحب الحلقة السلكية المستطيلة في الشكل 9.9 بعجلة ثابتة من منطقة يتعدم فيها المجال المغناطيسي إلى منطقة ذات مجال مغناطيسي موحّد. خلال هذه العملية، فإن التيار المستحث في الحلقة

(a) سيباوي الصفر.

(b) سيكون قيمة ثابتة ما لا تساوي الصفر.

(c) سيزداد خطيًا مع الزمن.

(d) سيزداد أسّيًا مع الزمن.

(e) سيزداد خطيًا مع مربع الزمن.

9.3 أي مما يلي سيسبب تيارًا في حلقة سلكية في مجال مغناطيسي موحّد؟

(a) خفض مقدار المجال

(b) تدوير الحلقة حول محور مواز للمجال

(c) تحريك الحلقة داخل المجال

(d) كل ما سبق

(e) لا شيء مما سبق

9.4 ينص قانون فاراداي للحث على أن

(a) يستحث فرق جهد في حلقة عند حدوث تغير في التدفق المغناطيسي عبر الحلقة.

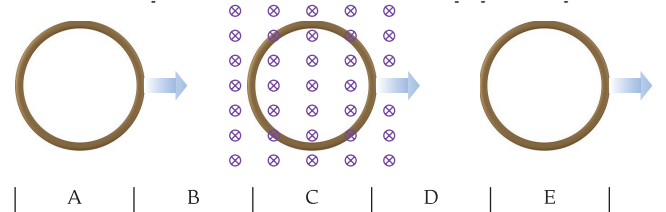
(b) التيار المستحث في حلقة بواسطة مجال مغناطيسي متغير يولد مجالًا مغناطيسيًا يقاوم هذا التغير في المجال المغناطيسي.

(c) يستحث المجال المغناطيسي المتغير مجالًا كهربائيًا.

(d) حث جهاز هو قياس مقاومته للتغيرات في التيار المتدفق خلاله.

(e) التدفق المغناطيسي هو ناقل ضرب متوسط المجال المغناطيسي والمنطقة المتعامدة عليه التي يخترقها.

9.5 تتحرك حلقة توصيل من اليسار إلى اليمين عبر مجال مغناطيسي منتظم. كما هو موضح في الشكل. في أي منطقة (مناطق) يوجد تيار مستحث في الحلقة؟



(a) المنطقتان B و D

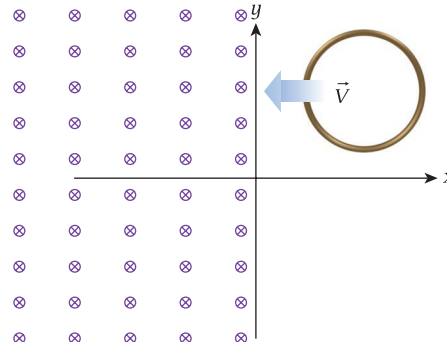
(b) المناطق B و C و D و E

(c) المنطقة C

(d) المناطق من A إلى E

9.6 تدخل حلقة سلكية دائرية تتحرك في المستوى xy بسرعة متجهة ثابتة في اتجاه x السالب مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا يغطي المنطقة التي فيها $x < 0$. كما موضح في الشكل. يشير متجه السطح العمودي للحلقة في اتجاه المجال المغناطيسي. أي من العبارات التالية صحيحة؟

(a) يكون فرق الجهد المستحث في الحلقة عند قيمته القصوى بمجرد دخول حافة الحلقة منطقة المجال المغناطيسي.



أسئلة مفاهيمية

9.15 عند توصيل ثلاثة بمقياس الحائط، تظهر أحياناً شرارة بين شوكتي القابس. ما سبب ذلك؟

9.16 غالباً ما يتم تحذير الأشخاص الذين لديهم منظم ضربات القلب أو أجهزة ميكانيكية أخرى مثل الأجهزة المزروعة جراحياً للابتعاد عن الآلات أو الحركات الكبيرة. لماذا؟

9.17 تناولت الوحدة 14 المذبذبات التوافقية المُحمَّدة، التي تعتمد فيها قوة التخميد على السرعة المتجهة وتقاوم دائماً حركة المذبذب. تتمثل إحدى طرق إنتاج هذا النوع من القوة في استخدام قطعة معدنية، مثل الألمنيوم، تتحرك عبر مجال مغناطيسي غير منتظم. اشرح لماذا يمكن لهذه التقنية إنتاج قوة تخميد.



9.18 في عرض توضيحي شهير في إحدى المحاضرات، أسقط مغناطيس دائم أسطوانتي الشكل إلى أسفل أنبوب ألومنيوم طويل كما هو موضح في الشكل. بتجاهل احتكاك المغناطيس بالجدران الداخلية للأنبوب وفرض أن الأنبوب طويل جداً مقارنة بحجم المغناطيس. هل ستزداد سرعة سقوط المغناطيس إلى الأسفل بعجلة تساوي g (سقوط حر)؟ إن لم يكن كذلك، فصف الحركة النهائية للمغناطيس. هل سيهبط القطبان الشمالي أو الجنوبي للمغناطيس أهمية إذا كان أحدهما في الجانب السفلي؟

9.19 يتضمن عرضاً توضيحياً شهيراً للتيارات الدوامية إسقاط مغناطيس إلى أسفل أنبوب معدني طويل وأنبوب زجاجي أو بلاستيكي طويل. مع سقوط المغناطيس عبر أنبوب، يتغير التدفق المغناطيسي مع تحرك المغناطيس باتجاه كل جزء من الأنبوب أو بعيداً عنه.

(a) أي أنبوب يتضمن جهداً أكبر مستحثاً بداخله؟

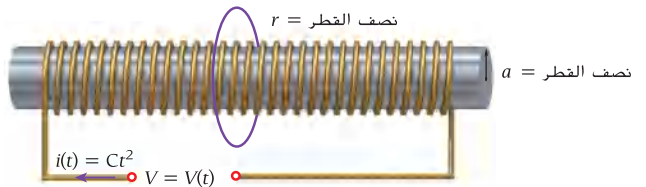
(a) أي أنبوب يتضمن تيارات دوامية أكبر مستحثة بداخله؟

9.20 يتغير التيار المار في ملف لولبي طويل جداً وملفوف بإحكام نصف قطره a وعدد لفاته n لفة لكل طول وحدة مع الزمن وفق المعادلة $i(t) = Ct^2$. حيث يُعّاس التيار i بوحدة الأمبير والوقت t بوحدة الثانية و C ثابت بوحدات مناسبة. تتحد مع الملف اللولبي في المركز حلقة توصيل نصف قطرها r . كما هو موضح في الشكل.

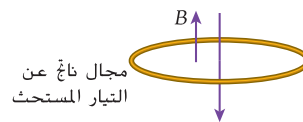
(a) اكتب تعبيراً لفرق الجهد المستحث في الحلقة.

(b) اكتب تعبيراً لمقدار المجال الكهربائي المستحث عند نقطة عشوائية على الحلقة.

(c) هل تُعد الحلقة ضرورية لوجود المجال الكهربائي المستحث؟



9.21 تشهد حلقة سلكية دائرية حقلًا مغناطيسياً متزايداً في الاتجاه إلى أعلى، كما هو موضح في الشكل. حدد اتجاه التيار المستحث في الحلقة؟



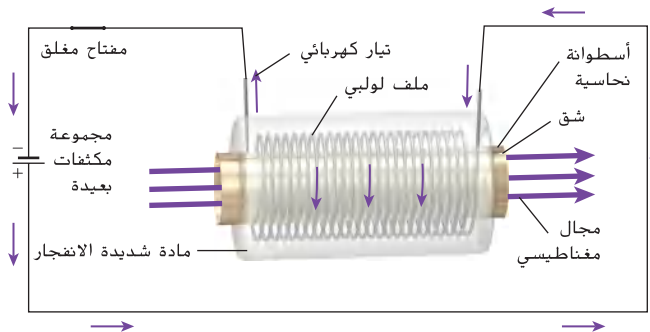
9.22 حلقة توصيل مربعة يبلغ طول أضلاعها L تدور بسرعة زاوية ثابتة، ω ، في مجال مغناطيسي منتظم مقداره B .

عند الزمن $t = 0$ ، يتم توجيه الحلقة بحيث يكون الاتجاه المتعامد على الحلقة موازاً للمجال المغناطيسي. أوجد تعبيراً لفرق الجهد المستحث في الحلقة كدالة زمن.

9.23 يدور قرص معدني صلب نصف قطره R حول محوره المركزي بسرعة زاوية ثابتة ω . يقع القرص في مجال مغناطيسي منتظم مقداره B في اتجاه عمودي على سطح القرص. احسب مقدار فرق الجهد بين مركز القرص والحافة الخارجية.

9.24 من المؤكد أن المجالات الكهربائية الكبيرة تشكل خطراً على جسم الإنسان. حيث يمكنها توليد تيارات خطيرة. لكن ماذا عن المجالات المغناطيسية الكبيرة؟ يسير رجل طوله 1.80 m بمعدل 2.00 m/s عمودياً على مجال مغناطيسي أفقي مقداره 5.0 T . بمعنى، أنه يسير بين وجهي قطب مغناطيس كبير جداً (يمكن العثور على هذا المغناطيس، مثلاً، في المختبر الوطني لمسرّع الجسيمات فائق التوصيل في جامعة ولاية ميشيغان). بفرض أن جسمه مليء بالموائع الموصلة، قدر فرق الجهد المستحث بين رأسه وقدميه.

9.25 يوجد في مختبرات لوس ألاموس الوطنية، إحدى وسائل إنتاج مجالات مغناطيسية كبيرة جداً، جهاز $EPFEG$ (مولد النبضات الكهرومغناطيسية عبر ضغط التدفق باستخدام مواد عالية الانفجار)، والذي يُستخدم لدراسة آثار النبضات الكهرومغناطيسية عالية الطاقة (EMP) في الحرب الإلكترونية. تتم تعبئة المتفجرات وتفجيرها في الحيز بين ملف لولبي وأسطوانة نحاسية صغيرة داخل الملف اللولبي ومتحدة معه في المحور. كما هو موضح في الشكل. يحدث الانفجار خلال فترة قصيرة جداً ثم تنهار الأسطوانة بسرعة. يولد هذا التغير السريع تيارات حثية تحافظ على ثابت التدفق المغناطيسي بينما يتقلص نصف قطر الأسطوانة بمعدل قدره r_f/r_i . وأيضاً قدر المجال المغناطيسي الناتج. بفرض أن نصف القطر ينضغط بمعامل قدره 14 وأن المقدار الأولي للمجال المغناطيسي، B ، يساوي 1.0 T .



9.26 وضعت حلقة معدنية في وضع مسطح على الأرض. يتزايد مقدار مجال مغناطيسي متجه إلى أعلى، خارجاً من الأرض. بينما تنظر إلى أسفل باتجاه الحلقة، حدد اتجاه التيار المستحث في الحلقة؟

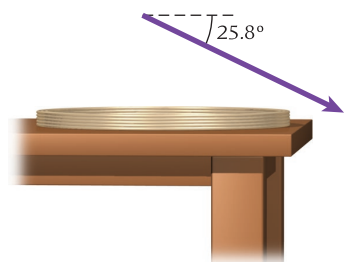
9.27 يتم فكّ سلك ملف لولبي ملفوف بإحكام ثم يُعاد لفه ليشكل ملفاً لولبياً آخر قطره ضعف الملف اللولبي الأول. ما معامل تغير الحث؟

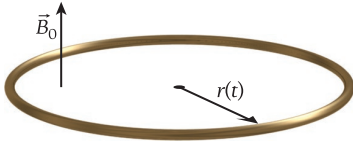
تمارين

يشير رقم المسألة الأزرق إلى وجود حل للمسألة في دليل حلول الطالب. تشير علامة النقطة الواحدة • والنقطتين •• إلى زيادة مستوى صعوبة المسألة.

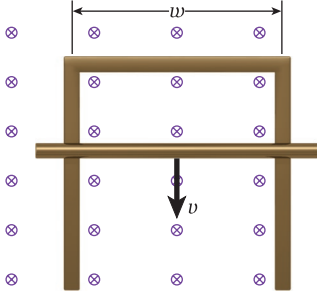
القسمان 9.1 و 9.2

9.28 يوضع ملفٌ سلكيٌّ دائريٌّ يتكون من 20 لفة ونصف قطره 40.0 cm في وضع



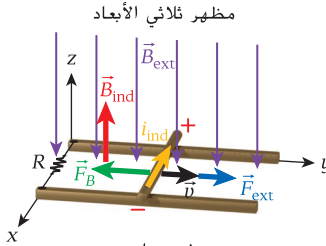


و $v = 0.0150 \text{ m/s}$. الحلقة لها مقاومة ثابتة تبلغ $R = 12.0 \Omega$ وتوضع في مجال مغناطيسي منتظم مقداره $B_0 = 0.750 \text{ T}$ عمودياً على مستوى الحلقة. كما هو موضح في الشكل. احسب اتجاه التيار المستحث، i ، ومقداره عند $t = 5.00 \text{ s}$.

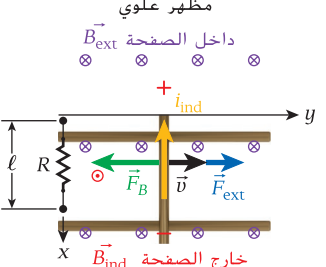


9.39* إطار مستطيل من سلك توصيل له مقاومة مهمة وعرضه w ومعلق رأسياً في مجال مغناطيسي مقداره B . كما هو موضح في الشكل. يُوضع قضيب معدني كتلته m ومقاومته R عبر الإطار. مع ملامسته للإطار باستمرار. استنبط تعبيراً للسرعة المتجهة الطرفية للقضيب إذا سمح له بالسقوط بحرية على طول هذا الإطار بدءاً من وضع السكون. أهمل الاحتكاك بين الأسلاك والقضيب المعدني.

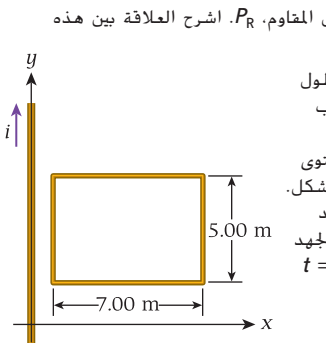
9.40* يتم توصيل ساقين موصلين متوازيين لهما مقاومة مهمة من أحد الطرفين بواسطة مقاوم مقاومته R . كما هو موضح في الشكل. يُوضع الساقان في مجال مغناطيسي \vec{B}_{ext} متعامد على مستوى الساقين. يكون هذا المجال المغناطيسي منتظماً ولا يعتمد على الزمن. المسافة بين الساقين هي ℓ . ينزلق عمود توصيل دون احتكاك على قمة الساقين بسرعة متجهة ثابتة \vec{v} .



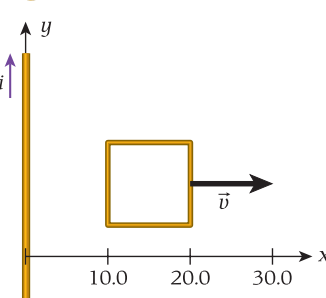
(a) باستخدام قانون فاراداي للحث، احسب مقدار فرق الجهد المستحث في العمود المتحرك. (b) احسب مقدار التيار المستحث في العمود. (c) وضح أنه لكي يتحرك العمود بسرعة متجهة ثابتة كما هو موضح، يجب سحبه بقوة خارجية، \vec{F}_{ext} ثم احسب مقدار هذه القوة. (d) احسب مقدار الشغل المبذول، W_{ext} والقدرة المولدة، P_{ext} بواسطة القوة الخارجية في العمود المتحرك. (e) احسب القدرة المستخدمة (المبددة) بفعل المقاوم، P_R . اشرح العلاقة بين هذه النتيجة والنتائج الواردة في الجزء (d).



9.41* يتحرك سلك طويل مستقيم على طول المحور y . يحمل السلك تياراً في اتجاه y الموجب الذي يتغير كدالة زمن وفق $i = 2.00 \text{ A} + (0.300 \text{ A/s})t$. توجد حلقة سلكية في المستوى xy بالقرب من المحور y . كما هو موضح في الشكل. أبعاد الحلقة هي 7.00 m وتبعد عن السلك مسافة 1.00 m . كم يبلغ فرق الجهد المستحث في الحلقة السلكية عند $t = 10.0 \text{ s}$ ؟

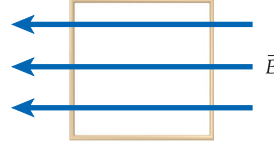


9.42* يتدفق التيار $i = 1.00$ في السلك الطويل المستقيم الموضح في الشكل. تقع حلقة مربعة طول ضلعها 10.0 cm ومقاومتها 0.0200Ω على مسافة 10.0 cm من السلك. ثم يتم تحريك الحلقة في اتجاه x الموجب بسرعة $v = 10.0 \text{ cm/s}$.



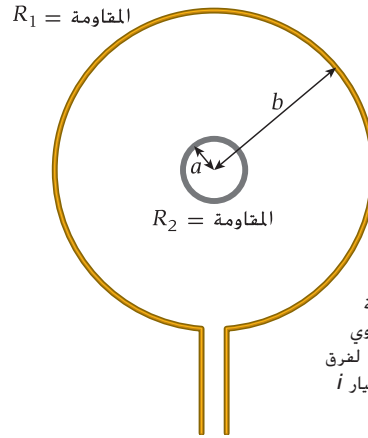
(a) أوجد اتجاه التيار المستحث في الحلقة.

9.30 يحتوي ملف مكون من 8 لفات على حلقات مربعة يبلغ طول ضلعها 0.200 m ومقاومتها 3.00Ω . يوضع في مجال مغناطيسي يصنع زاوية قدرها 40.0° مع مستوى كل حلقة. يختلف مقدار هذا المجال مع الوقت وفق المعادلة $B = 1.50t^3$. حيث يقاس t بالثانية و B بوحدة التسلا. ما مقدار التيار المستحث في الملف عندما يكون $t = 2.00 \text{ s}$ ؟



9.31 حلقة معدنية مساحتها 0.100 m^2 موضوعة في وضع مسطح على الأرض. يوجد مجال مغناطيسي منتظم يشير نحو الغرب. كما هو موضح في الشكل. يبلغ المقدار الأولي لهذا المجال المغناطيسي 0.123 T . ينخفض بثبات ليصل إلى 0.075 T خلال فترة تبلغ 0.579 s . أوجد فرق الجهد المستحث في الحلقة خلال هذا الوقت.

9.32* يحتوي جهاز مراقبة التنفس على حلقة مرنة من سلك نحاسي، تلتف حول الصدر. عندما يتنفس الشخص الذي يرتديها، يزداد نصف قطر الحلقة السلكية ويقل. عندما يتنفس شخص موجود في المجال المغناطيسي للأرض (يفرض أنه $0.426 \times 10^{-4} \text{ T}$)، كم يبلغ متوسط التيار المار في الحلقة بفرض أن مقاومتها تبلغ 30.0Ω ويزداد نصف قطرها من 20.0 cm إلى 25.0 cm عبر زمن يبلغ 1.00 s ؟ بفرض أن المجال المغناطيسي متعامد على مستوى الحلقة.

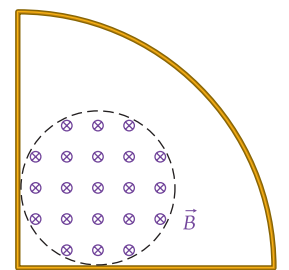


9.33* حلقة توصيل دائرية نصف قطرها a ومقاومتها R_1 متحدة المركز مع حلقة توصيل دائرية نصف قطرها $b \gg a$ ومقاومتها R_2 . يستخدم جهد معتمد على الوقت في الحلقة الأكبر؛ يتم تحديد التباين الجيبي البطيء مع الوقت بالمعادلة $V(t) = V_0 \sin \omega t$. حيث V_0 و ω ثوابت بأبعاد الجهد والوقت العكسي. على التوالي. بفرض أن المجال المغناطيسي في جميع أنحاء الحلقة الداخلية منتظم (ثابت في الفراغ) ويساوي المجال في مركز الحلقة. استنبط تعبيرات لفرق الجهد المستحث في الحلقة الداخلية والتيار i المار عبر الحلقة.

9.34* يحيط ملف لولبي طويل مساحة مقطعه العرضي A_1 بملف لولبي طويل آخر مساحة مقطعه العرضي $A_2 < A_1$ ومقاومته R . كلا الملفين اللولبيين لهما الطول نفسه وعدد اللفات نفسه. يتدفق تياراً يحدد بالعلاقة $i = i_0 \cos \omega t$ عبر الملف اللولبي الخارجي. أوجد تعبيراً للمجال المغناطيسي في الملف اللولبي الداخلي الناتج عن التيار المستحث.

القسم 9.3

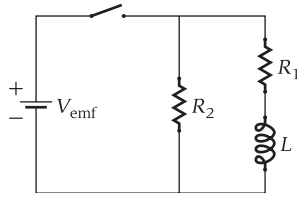
9.35 حلقة التوصيل في ربع الدائرة الموضحة في الشكل لها نصف قطر يبلغ 10.0 cm ومقاومة قدرها 0.200Ω . شدة المجال المغناطيسي الأولي داخل الدائرة المنقطة التي طول نصف قطرها 3.00 cm تبلغ 2.00 T . ثم تنخفض شدة المجال المغناطيسي من 2.00 T إلى 1.00 T في 2.00 s . أوجد (a) مقدار و (b) اتجاه التيار المستحث في الحلقة.



9.36 خلق طائرة أسرع من الصوت يبلغ باع الجناح 10.0 m فوق القطب المغناطيسي الشمالي (في مجال مغناطيسي مقداره 0.500 G موجه عمودياً على الأرض) بسرعة اقترح أن الجناحين مصنوعان من الألمنيوم.

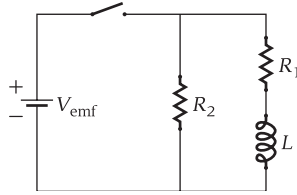
9.37* تخوم طائرة مروحية فوق القطب المغناطيسي الشمالي في مجال مغناطيسي مقداره 0.426 G وموجه عمودياً على الأرض. يبلغ طول مراوح طائرة المصنوعة من الألومنيوم 10.0 m وتدور حول المحور بسرعة دوران محوري تبلغ $1.00 \times 10^4 \text{ rpm}$. كم يبلغ فرق الجهد من المحور إلى نهاية المروحة؟

9.38* تتوسع حلقة توصيل دائرية مرنة بمعدل ثابت بمرور الزمن بحيث يُحدد نصف قطرها بواسطة $r(t) = r_0 + vt$ حيث $r_0 = 0.100 \text{ m}$.

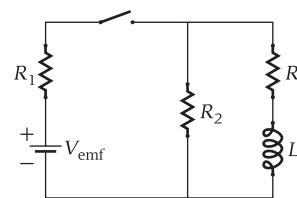


- (d) فرق الجهد عبر R_1
(e) فرق الجهد عبر R_2
(f) فرق الجهد عبر L
(g) معدل تغير التيار عبر R_1

9.53. في الدارة الموضحة في الشكل، توفر بطارية $V_{emf} = 18.0 \text{ V}$ و $R_1 = 6.00 \Omega$ و $R_2 = 6.00 \Omega$ و $L = 5.00 \text{ H}$. احسب كلاً مما يلي بعد غلق المفتاح بمدة طويلة:



- (a) التيار المتدفق خارج البطارية
(b) التيار المار في R_1
(c) التيار المار في R_2
(d) فرق الجهد عبر R_1
(e) فرق الجهد عبر R_2
(f) فرق الجهد عبر L
(g) معدل تغير التيار عبر R_1



9.54. تتكون دارة من بطارية وثلاثة مقاومات ومحث، كما هو موضح في الشكل. كم سيبلغ التيار المار عبر كل مقاوم (a) بعد غلق المفتاح مباشرة و (b) بعد غلق المفتاح بمدة طويلة؟ (c) بفرض أنه أعيد فتح المفتاح بعد فترة طويلة من إغلاقه. كم يبلغ مقدار التيار المار في كل مقاوم؟ وبعد مدة طويلة؟

القسم 9.9

9.55 يشجع أحد المخترعين في الاستفادة من الطاقة المرتبطة بالمجال المغناطيسي للأرض، وذلك بعد علمه مباشرة بوجود طاقة مرتبطة بالمجالات المغناطيسية. ما حجم الفضاء القريب من سطح الأرض الذي يحتوي على 1.00 J من الطاقة. بفرض أن شدة المجال المغناطيسي تساوي $5.00 \times 10^{-5} \text{ T}$ ؟



9.56 يمكن تشبيه المغناطيس فائق التوصيل المستخدم في التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) السريبري بأنه ملف لولبي قطره 1.00 m وطوله 1.50 m ومقدار مجاله المغناطيسي المنتظم 3.00 T . حدد (a) كثافة طاقة المجال المغناطيسي و (b) الطاقة الكلية في الملف اللولبي.

9.57 يمتلك نجم مغناطيسي (نجم نيوتروني مغناطيسي) مجالاً مغناطيسياً بالقرب من سطحه قدره $4.00 \times 10^{10} \text{ T}$.

(a) احسب كثافة الطاقة لهذا المجال المغناطيسي.

(b) تربط نظرية النسبية الخاصة الطاقة بأي كتلة m في وضع السكون وفق $E_0 = mc^2$. أوجد الكثافة الكتلية في وضع السكون المرتبطة بكثافة الطاقة في الجزء (a).

9.58. تؤثر قوة دافعة كهربية مقدارها 20.0 V في ملف حثه 40.0 mH ومقاومته 0.500Ω .

(a) حدّد الطاقة المخزنة في المجال المغناطيسي عندما يبلغ التيار $\frac{1}{4}$ قيمته العظمى.
(b) ما المدة التي يستغرقها التيار ليصل إلى هذه القيمة؟

9.59. ترتدي طالبة خاتماً ذهبياً كتلته 15.0 g ونصف قطره 0.750 cm (مقاومته $61.9 \mu\Omega$ وسعة حرارته النوعية $c = 19 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$) على إصبعها، وتغرق إصبعها من منطقة ذات مجال مغناطيسي قدره 0.0800 T . موجه بطول إصبعها، إلى منطقة منعدمة المجال المغناطيسي في 40.0 ms . نتيجة لهذا الإجراء، يكتسب الخاتم طاقة حرارية بسبب التيار المستحث، الذي يزيد درجة حرارة الخاتم. احسب ارتفاع درجة الحرارة في الخاتم. بفرض أن كل الطاقة الناتجة تُستخدم في رفع درجة الحرارة.

9.60. ينقلب ملفٌ عدد لفاته N ومساحته A ، يحمل تياراً ثابتاً i ، في مجال مغناطيسي خارجي \vec{B}_{ext} بحيث يتحول عزم ثنائي القطب له من مقاومة المجال إلى

(b) حدّد اتجاهات القوى المغناطيسية المؤثرة في جميع أضلاع الحلقة المربعة.
(c) احسب اتجاه محصلة القوى المؤثرة في الحلقة ومقدارها في اللحظة التي تبدأ فيها التحرك.

القسم 9.4

9.43 يتكون مولد بسيط من حلقة تدور داخل مجال مغناطيسي ثابت (انظر الشكل 9.19). إذا كانت الحلقة تدور بتردد f ، فإنه يمكن تحديد التدفق المغناطيسي بواسطة $\Phi(t) = BA \cos(2\pi ft)$. إذا كان $B = 1.00 \text{ T}$ و $A = 1.00 \text{ m}^2$ ، فكم يجب أن تكون قيمة f حتى يصبح الحد الأقصى لفرق الجهد المستحث 110 V ؟

9.44. يحتوي محرك على حلقة واحدة داخل مجال مغناطيسي مقداره 0.870 T . إذا كانت مساحة الحلقة 300 cm^2 ، فأوجد السرعة الزاوية القصوى المحتملة لهذا المحرك عند توصيله بمصدر قوة دافعة كهربائية يوفر 170 V .

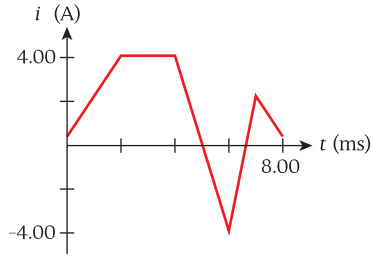
9.45. يقرر صديقك إنتاج طاقة كهربائية من خلال تدوير ملف من 1.00×10^5 حلقة سلكية دائرية حول محور عمودي على المجال المغناطيسي للأرض، الذي يبلغ مقداره المحلي 0.300 G . نصف قطر الحلقات يساوي 25.0 cm .

(a) إذا أدار صديقك الملف بتردد قدره 150 Hz ، ما أقصى تيار سينتدفق في مقاوم، $R = 150 \text{ k}\Omega$ ، متصل بالملف؟

(b) سيبلغ متوسط التيار المتدفق في الملف 0.7071 أضعاف أقصى تيار. كم سيبلغ متوسط القدرة الناتجة عن هذا الجهاز؟

القسمان 9.6 و 9.7

9.46 أوجد الحث المتبادل للملف اللولبي والملف الموضح في المثال 9.1 وكذلك فرق الجهد المستحث في الملف عند $t = 2.0 \text{ s}$ باستخدام الأساليب الموضحة في القسم 9.7. ما وجه مقارنة نتائج فرق الجهد المستحث؟



9.47 يوضح الشكل التيار المار خلال محث حثه 10.0 mH خلال فترة زمنية قدرها 8.00 ms . ارسم تمثيلاً بيانياً يوضح فرق الجهد المستحث ذاتياً، $\Delta V_{ind,L}$ ، لحث خلال الفترة الزمنية ذاتها.

9.48. يحتوي ملف قصير نصف قطره $R = 10.0 \text{ cm}$ على $N = 30.0$ لفة ويحيط بملف لولبي طويل نصف قطره $r = 8.00 \text{ cm}$ يحتوي على $n = 60$ لفة لكل سنتيمتر. يزداد التيار المار في الملف القصير بمعدل ثابت من الصفر إلى $i = 2.00 \text{ A}$ في زمن $t = 12.0 \text{ s}$. احسب فرق الجهد المستحث في الملف اللولبي الطويل أثناء زيادة التيار في الملف القصير.

القسم 9.8

9.49 فكر في دارة محث ومقاوم (RL) مقاومتها $R = 1.00 \text{ M}\Omega$ وحثها $L = 1.00 \text{ H}$. تعمل بطارية جهدها 10.0 V .

(a) كم يبلغ الثابت الزمني للدارة؟
(b) إذا تم إغلاق المفتاح عند الزمن $t = 0$ ، فما مقدار التيار بعد ذلك الزمن مباشرة؟ وبعد $2.00 \mu\text{s}$ ؟ وبعد مرور فترة زمنية طويلة؟

9.50 في الدارة الموضحة في الشكل، $R = 120 \Omega$ و $L = 3.00 \text{ H}$ و $V_{emf} = 40.0 \text{ V}$. بعد غلق المفتاح، ما المدة التي سيستغرقها التيار المار في الحث ليصل إلى 300 mA ؟

9.51 يزداد التيار بمعدل 3.60 A/s في دارة محث ومقاوم (RL) مقاومتها $R = 3.25 \Omega$ و $L = 440 \text{ mH}$. كم يبلغ فرق الجهد في الدارة عند اللحظة التي يبلغ فيها التيار المار 3.00 A ؟

9.52. في الدارة الموضحة في الشكل، توفر بطارية $V_{emf} = 18.0 \text{ V}$ و $R_1 = 6.00 \Omega$ و $R_2 = 6.00 \Omega$ و $L = 5.00 \text{ H}$. احسب كلاً مما يلي بعد غلق المفتاح مباشرة:

- (a) التيار المتدفق خارج البطارية
(b) التيار المار في R_1
(c) التيار المار في R_2

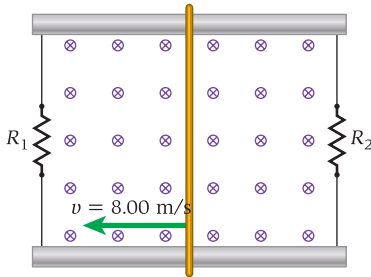
- (c) عند الزمن 500 ms من قفل المفتاح. ما كمية التيار المار في المقاوم R_1 والمقاوم R_2 ؟
 (d) بعد مرور فترة زمنية طويلة (>10.0 s). قُفَّت المفتاح مرة أخرى. بعد فتح المفتاح مباشرة، ما كمية التيار المار في المقاومة R_1 والمقاومة R_2 ؟
 (e) بعد مرور 50.0 ms من فتح المفتاح. ما مقدار التيار المار في المقاومة R_1 والمقاومة R_2 ؟
 (f) بعد مرور 500. ms من فتح المفتاح. ما كمية التيار المار في المقاومة R_1 والمقاومة R_2 ؟
9.71• يحمل ملف لولبي طويل طوله 3.00 m وعدد لفاته $n = 90$ لفة/m تيارًا شدته 3.00 A. ويحتوي على طاقة مخزنة قدرها 2.80 J. ما مساحة المقطع العرضي للملف اللولبي؟

- 9.72•** تُوضَع حلقة توصيل مستطيلة الشكل أبعادها a و b ومقاومتها R في المستوى xy . ويمر مجال مغناطيسي مقداره B خلال الحلقة. يسير المجال في اتجاه z الموجب ويتغير مع الزمن وفق المعادلة $B = B_0(1 + c_1 t^2)$ ، حيث c_1 هو ثابت بوحدات $1/s^3$. ما اتجاه التيار المستحث في الحلقة وما مقداره عند $t = 1$ s (بدلالة a و b و R و B_0 و c_1)؟

- 9.73•** تتكون دائرة من بطارية 12.0 V ومفتاح ومصباح ضوئي، بالاتصال على التوالي. وعندما مر بالمصباح الضوئي تيار شدته 0.100 A. بدأ في التوهج على الفور. يسحب هذا المصباح قدرة كهربائية 2.00 W عند قفل المفتاح لفترة زمنية طويلة. يُفْتَح المفتاح ويُضاف محث للدائرة. بحيث يتصل على التوالي مع المصباح. فإذا بدأ المصباح في التوهج بعد مرور 3.50 ms من قفل المفتاح مرة أخرى، فما مقدار الحث؟ تجاهل أي زمن لازم لتسخين الفتيلة، وافترض أنك قادر على ملاحظة التوهج بمجرد وصول التيار في الفتيلة إلى عتبة 0.100 A.

- 9.74•** تُوضَع حلقة دائرية مساحتها A بشكل عمودي على مجال مغناطيسي يتغير مع الزمن ومقداره $B(t) = B_0 + at + bt^2$ ، حيث يكون B_0 و a و b ثوابت.

- (a) ما مقدار التدفق المغناطيسي عبر الحلقة عند $t = 0$ ؟
 (b) استنتج معادلة لفرق الجهد المستحث في الحلقة كدالة زمن.
 (c) ما مقدار التيار المستحث واتجاهه إذا كانت مقاومة الحلقة هي R ؟

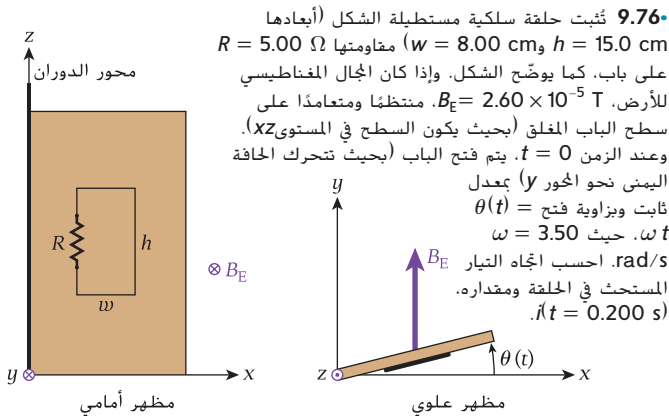


- 9.75•** ينزلق عمود توصيل طوله 50.0 cm فوق ساقين فلزيين متوازيين وموضوعين في مجال مغناطيسي مقداره 1.00 kG. كما يوضح الشكل. يتصل طرفا العمود بمقاومين، $R_1 = 100. \Omega$ و $R_2 = 200. \Omega$. يتحرك عمود التوصيل بسرعة ثابتة قدرها 8.00 m/s.

- (a) ما مقدارا التيارين المائزين في المقاومين؟

- (b) ما القدرة التي تصل إلى المقاومين؟

- (c) ما القوة اللازمة للإبقاء على حركة العمود بسرعة متجهة ثابتة؟



- 9.76•** تُثَبَّت حلقة سلكية مستطيلة الشكل (أبعادها $w = 8.00$ cm و $h = 15.0$ cm) مقاومتها $R = 5.00 \Omega$ على باب، كما يوضح الشكل. وإذا كان المجال المغناطيسي للأرض، $B_E = 2.60 \times 10^{-5}$ T، منتظمًا ومتعامدًا على سطح الباب المغلق (بحيث يكون السطح في المستوى xz). وعند الزمن $t = 0$ ، يتم فتح الباب (بحيث تتحرك الحافة اليمنى نحو المحور y) بمعدل ثابت وبزاوية فتح $\theta(t) = \omega t$ ، حيث $\omega = 3.50$ rad/s. احسب اتجاه التيار المستحث في الحلقة ومقداره. $t = 0.200$ s.

محاذاته. أثناء هذه العملية، يُنتج الحث فرق جهد يميل إلى تقليل التيار المار في الملف. احسب الشغل المبذول بواسطة مصدر طاقة الملف للحفاظ على التيار الثابت.

9.61•• تمتلك موجة كهرومغناطيسية منتشرة في الفراغ مجالات كهربائية

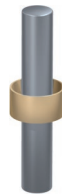
ومغناطيسية تُحدَّد من العلاقة $\vec{E}(\vec{x}, t) = \vec{E}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)$ و

$\vec{B}_0 = \vec{k} \times \vec{E}_0 / \omega$ حيث $\vec{B}(\vec{x}, t) = \vec{B}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)$

ومتجه الموجة \vec{k} متعامد على \vec{E}_0 و \vec{B}_0 يحقق المقدار \vec{k} والتردد الزاوي ω علاقة التبدد، $\omega/k = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$ حيث ϵ_0 و μ_0 النفاذية والسماحية للمساحة الحرة. على التوالي. تنتقل هذه الموجة الطاقة في المجالات الكهربائية والمغناطيسية معًا. احسب نسبة كثافات الطاقة في المجالات المغناطيسية والكهربائية، U_B/U_E ، في هذه الموجة. ببساطة إجابتك النهائية قدر الإمكان.

تمارين إضافية

- 9.62** يتحرك سلك طوله $\ell = 10.0$ cm بسرعة متجهة ثابتة في المستوى xy ؛ حيث يكون السلك موازيًا للمحور y ويتحرك على طول المحور x . إذا تم توجيه مجال مغناطيسي قدره 1.00 T على طول محور z الموجب، فكم يجب أن تكون السرعة المتجهة للسلك حتى يمكن أن يُستحث فرق جهد قدره 2.00 V عبر السلك؟



- 9.63** يتغير المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي الموضح في الشكل بمعدل 1.50 T/s. يحيط ملف توصيل مكون من 2000 لفة بالملف اللولبي، كما هو موضح. يبلغ نصف قطر الملف اللولبي 4.00 cm ونصف قطر الملف 7.00 cm. كم يبلغ فرق الجهد المستحث في الملف؟

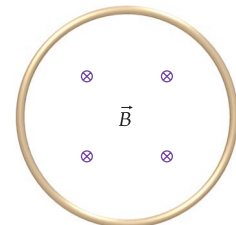
- 9.64** توفر بطارية نموذجية (من دون مقاومة داخلية) جهدًا هو V_{emf} وتتصل بملف فائق التوصيل (من دون مقاومة!) حثه L عند زمن $t = 0$. أوجد التيار المار في الملف كدالة زمن، $i(t)$. افترض أن جميع التوصيلات متعدمة المقاومة.

- 9.65** يحمل ملف لولبي يتكون من 100 لفة وطوله 8.00 cm ونصف قطره 6.00 mm تيارًا شدته 0.400 A يتدفق من اليمين إلى اليسار. ثم يعكس التيار اتجاهه ليتدفق من اليسار إلى اليمين. ما مقدار تغير الطاقة المخزنة في المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي؟

- 9.66** يبلغ مقدار المجال الكهربائي القريب من سطح الأرض 150. N/C. ويبلغ مقدار المجال المغناطيسي للأرض بالقرب من السطح عادة 50.0 μ T. احسب كثافات الطاقة المرتبطة بالمجالين وقارن بينهما. افترض أن الخصائص الكهربائية والمغناطيسية للهواء هي نفسها خصائص الفراغ بشكل أساسي.

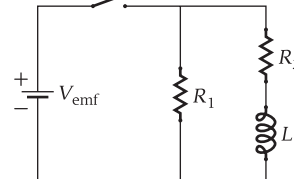
- 9.67** ما مقدار الحث في دائرة محث ومقاوم (RL) على التوالي مقاومتها $R = 3.00$ k Ω إذا ازداد التيار إلى $\frac{1}{2}$ قيمته النهائية في زمن 20.0 μ s؟

- 9.68** بطارية 100 V متصلة على التوالي مع مقاوم 500 V. وفق قانون فاراداي للحث، لا يمكن أبدًا أن يتغير التيار على الفور، لذلك يكون ثمة حث "شارد" دائمًا. افترض أن مقدار الحث الشارد 0.200 μ H. ما المدة التي سيستغرقها التيار ليرتفع في حدود 0.500% من قيمته النهائية 0.200 A بعد توصيل المقاوم بالبطارية؟



- 9.69** توضع حلقة سلكية أحادية مساحة مقطعيها 5.00 m² في مستوى الصفحة، كما يوضح الشكل. ثم يوجَّه مجال مغناطيسي يتغير مع الزمن في منطقة الحلقة إلى الصفحة، ويُحدَّد مقداره بالعلاقة $B = 3.00$ T + $(2.00$ T/s) t عند الزمن $t = 2.00$ s. ما مقدار فرق الجهد المستحث في الحلقة وما اتجاه التيار المستحث؟

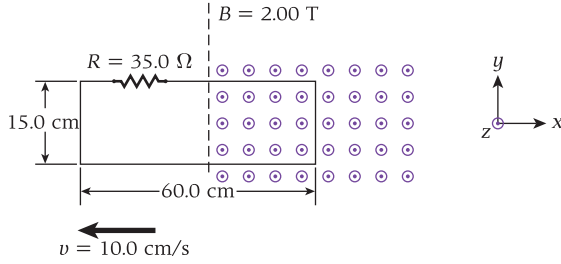
- 9.70** تتصل بطارية 9.00 V عبر مفتاح بمقاومتين متطابقتين ومحث نموذجي، كما يوضح الشكل. تبلغ مقاومة كل من المقاومين 100. Ω . ويبلغ مقدار الحث في الحث 3.00 H. يتم فتح المفتاح في البداية.



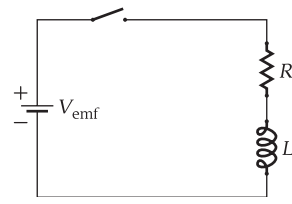
- (a) بعد قفل المفتاح مباشرة، ما مقدار التيار المار في المقاوم R_1 والمقاوم R_2 ؟
 (b) بعد مرور 50.0 ms من قفل المفتاح، ما مقدار التيار المار في المقاوم R_1 والمقاوم R_2 ؟

9.79• كما يوضح الشكل، تُعلق حلقة دائرية مستطيلة الشكل (طولها 60.0 cm وعرضها 15.0 cm) ومقاومتها 35.0Ω موازية للمستوى xy ، بحيث يقع نصفها داخل مجال مغناطيسي منتظم. ويؤجه المجال المغناطيسي الذي تحدده العلاقة $\vec{B} = 2.00\hat{z} \text{ T}$ على طول المحور z الموجب إلى يمين الخط المنقطع؛ لا يوجد مجال مغناطيسي خارجي على يسار الخط المنقطع.

- (a) احسب مقدار القوة اللازمة لتحريك الحلقة إلى اليسار بسرعة ثابتة قدرها 10.0 cm/s بينما يظل الطرف الأيمن للحلقة في المجال المغناطيسي.
(b) ما مقدار الطاقة المبذولة لسحب الحلقة خارج المجال المغناطيسي بهذه السرعة؟
(c) ما مقدار الطاقة التي يبدها المقاوم؟



9.77• تتدرج أسطوانة فولاذية نصف قطرها 2.50 cm وطولها 10.0 cm دون أن تنزلق أسفل منحدر يميل بزاوية 15.0° أعلى المستوى الأفقي ويبلغ طوله (على طول المنحدر) 3.00 m. ما فرق الجهد المستحث بين طرفي الأسطوانة في أثناء مغادرة الأسطوانة أسفل المنحدر، إذا كان ميل الهيوط للمنحدر في اتجاه المجال المغناطيسي للأرض عند هذا الموضع؟ (استخدم القيمة 0.426 G للشدة الموضعية للمجال المغناطيسي للأرض).



- 9.78•** يوضح الشكل دائرة بها بطارية تتصل بمقاوم ومحث على التوالي.
(a) ما قيمة التيار المار في الدائرة في أي زمن t بعد قفل المفتاح؟
(b) احسب إجمالي الطاقة التي توفرها البطارية بداية من الزمن $t = 0$ وحتى $t = L/R$.
(c) احسب إجمالي الطاقة المتبددة في المقاوم خلال المدة الزمنية نفسها.
(d) هل الطاقة محفوظة في هذه الدائرة؟

تمارين بمعطيات متعددة

- 9.84** يُلقى خاتم زواج في الهواء مع الدوران، لتنتج سرعة زاوية قدرها 13.5 rev/s ويكون محور الدوران هو قطر الخاتم. ويبلغ مقدار المجال المغناطيسي للأرض $4.97 \times 10^{-5} \text{ T}$ في موقع الخاتم. فإذا بلغ أقصى حد لفرق الجهد المستحث في الخاتم $1.446 \times 10^{-6} \text{ V}$ ، فما طول قطر الخاتم؟
9.85 يُلقى خاتم زواج قطره 1.63 cm في الهواء مع الدوران، لتنتج سرعة زاوية قدرها 13.7 rev/s ويكون محور الدوران هو قطر الخاتم. فإذا بلغ أقصى حد لفرق الجهد المستحث في الخاتم $6.556 \times 10^{-7} \text{ V}$ ، فما مقدار المجال المغناطيسي للأرض في هذا الموقع؟

- 9.80** ما مقدار المقاومة في دائرة محث ومقاوم (RL) فيها $L = 33.03 \text{ mH}$ إذا كان الزمن اللازم ليصل التيار إلى 75% من أقصى حد لقيمتيه هو 3.350 ms ؟
9.81 ما مقدار الحث في دائرة محث ومقاوم (RL) حيث $R = 17.88 \Omega$ إذا كان الزمن اللازم ليصل التيار إلى 75% من أقصى حد لقيمتيه هو 3.450 ms ؟
9.82 في دائرة الحث والمقاوم (RL) التي مقاومتها $R = 21.84 \Omega$ وحثها $L = 55.93 \text{ mH}$ ، ما الزمن الذي يستغرقه التيار ليصل إلى 75% من أقصى حد لقيمتيه؟

- 9.83** يُلقى خاتم زواج (قطره 1.95 cm) في الهواء مع الدوران، لتنتج سرعة زاوية قدرها 13.3 rev/s ويكون محور الدوران هو قطر الخاتم. فإذا كان مقدار المجال المغناطيسي للأرض في موقع الخاتم $4.77 \times 10^{-5} \text{ T}$ ، فما أقصى حد لفرق الجهد المستحث في الخاتم؟

10

دوائر التيار المتردد

Alternating Current Circuits

258 ما سنتعلمه

- 258 10.1 دوائر الحثات والمكثفات (LC)
- 260 10.2 تحليل ذبذبات دائرة الحث والمكثف (LC)
- 262 مثال 10.1 خصائص دائرة الحث والمكثف (LC)
- 262 10.3 الذبذبات المتخادمة في دائرة الحث والمكثف والمقاوم (RLC)
- 264 10.4 عمل دوائر التيار المتردد القوة الدافعة الكهربائية المترددة دائرة مقاوم أومي دائرة مكثف دائرة محث نقي
- 266 10.5 دائرة محث ومكثف ومقاوم موصلة على التوالي مثال واقعي
- 269 مثال 10.2 خصائص دائرة الحث والمكثف والمقاوم (RLC)
- 270 مرشحات التردد
- 271 مثال 10.3 دائرة الرنين لمكبرات الصوت
- 273 10.6 الطاقة والقدرة في دوائر التيار المتردد
- 273 مسألة محلولة 10.1 انخفاض الجهد عبر الحث
- 275 مسألة محلولة 10.2 القدرة المتبددة في دائرة الحث والمكثف والمقاوم (RLC)
- 276 عامل الجودة
- 277 مستقبل راديو AM
- 277 مسألة محلولة 10.3 مقدار معامل الحث المجهول في دائرة الحث والمقاوم (RL)
- 278
- 279 10.7 الخوالات
- 281 10.8 المقوّمات
- 283 ما تعلمناه/ دليل المذاكرة للاختبار
- 284 إرشادات حل المسائل
- 284 أسئلة الاختيار من متعدد
- 284 أسئلة مفاهيمية
- 285 تمارين
- 288 تمارين بمعطيات متعددة



الشكل 10.1 معظم الأجهزة الموجودة على مكتب الطالب تعمل عادةً بالتيار المتردد.

تعمل كل الأجهزة المنزلية تقريبًا بالكهرباء. على سبيل المثال، يوضح الشكل 10.1 بعض الأجهزة الإلكترونية الاستهلاكية الترفيهية (كمبيوتر محمول، طابعة ليزر، مصباح مكتب، هاتف ذكي، وساعة رأس)، فهي تجعل المهام أسهل بتحويل الكهرباء إلى ضوء وصوت وتمكيننا من التواصل مع العالم من حولنا. كما أن الثلاجات وأجهزة التلفزيون والغسالات الكهربائية وأفران الميكروويف ومكيفات الهواء ومجففات الشعر وغيرها من الأجهزة التي نستخدمها تعمل بالكهرباء.

يستهلك العالم أكثر من 2 تيراواط من الطاقة الكهربائية، وتستخدم أمريكا الشمالية وحدها ربع إجمالي هذه الطاقة. وقد تضاعف الاستخدام العالمي للطاقة الكهربائية في ربع القرن الأخير، غالبًا بسبب النمو القوي في شرق آسيا. وغالبًا ما تصل هذه الكهرباء كلها إلى المستهلكين عبر التيار المتردد، وهو الموضوع الرئيس لهذه الوحدة.

في الوحدات من 4 إلى 6 و9، درسنا دوائر التيار المستمر التي يتدفق فيها التيار في اتجاه واحد. أما في هذه الوحدة، فسندرس دوائر التيار المتردد التي تستخدم قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن. تحتوي دوائر التيار المتردد على المكونات نفسها لدوائر التيار المستمر (المقاومات والمكثفات والحثات)، لكنها تُظهر ظواهر فيزيائية مشوّقة وذات أهمية بالغة بالنسبة إلى التطبيقات التكنولوجية. في هذه الوحدة، سنعرف ما الذي يُنتج الذبذبات في التيارات والجهود، وكيفية اعتماد المقاومة في الدائرة على تردد الذبذبة، وكيفية استخدام ذلك في المرشحات، وكيفية تحويل التيارات والجهود المترددة وتحويلها.

ما سنتعلمه

- الجهود والتيارات الكهربائية في دوائر المسار الواحد المحتوية على محث ومكثف تتذبذب بتردد مميز.
- الجهود والتيارات الكهربائية في دوائر المسار الواحد المحتوية على مقاوم ومحث ومكثف تتذبذب أيضًا بتردد مميز، لكن تتخامد هذه الذبذبات مع مرور الوقت.
- دائرة المسار الواحد التي تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن ومقاوم تكون فيها الجهود والتيارات الكهربائية متفقتة في الطور ومتغيرة مع الزمن.
- دائرة المسار الواحد التي تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن ومكثف يكون فيها الجهد والتيار متغيرين مع الزمن ومختلفي الطور بفرق طور مقداره $(+90^\circ) + \pi/2 \text{ rad}$. ويسبق التيار الجهد. ويرتبط الجهد والتيار في هذه الدائرة بالمفاعلة السعوية.
- دائرة المسار الواحد التي تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن ومحث يكون فيها الجهد والتيار متغيرين مع الزمن ومختلفي الطور بفرق طور مقداره $(-90^\circ) - \pi/2 \text{ rad}$. ويسبق الجهد التيار. ويرتبط الجهد والتيار في هذه الدائرة بالمفاعلة الحثية.
- دائرة المسار الواحد التي تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن ومقاوم ومكثف ومحث يكون فيها تردد رنين تحدده قيمتا الحث والسعة.
- تماثل معاوقة دائرة التيار المتردد مع مقاومة دائرة التيار المستمر، إلا أن المعاوقة تعتمد على تردد مصدر القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن.
- تُستخدم المحوِّلات لرفع (أو خفض) الجهد الكهربائي المتردد عند انخفاض (أو ارتفاع) التيار المتردد.
- تُستخدم المقوِّمات لتحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر.

10.1 دوائر الحثات والمكثفات LC Circuits

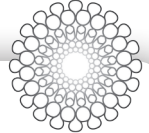
تعرفنا في الوحدات السابقة على ثلاثة مكونات للدائرة: المكثفات والمقاومات والحثات. ودرسنا الدوائر البسيطة ذات المسار الواحد المحتوية على المقاومات والمكثفات (RC)، أو المحتوية على المقاومات والحثات (RL). وسندرس الآن الدوائر البسيطة ذات المسار الواحد المحتوية على الحثات والمكثفات: **دوائر الحثات والمكثفات (LC)**. سنرى أن دوائر الحثات والمكثفات (LC) تتغير تياراتها وجهودها جيبيًا مع الزمن، بدلاً من أن تتزايد أو تتناقص أسياً مع الزمن، مثل تيارات وجهود دوائر المقاومات والمكثفات (RC) ودوائر الحث والمقاوم (RL). تُسمى تغيرات الجهد والتيار هذه في دوائر الحثات والمكثفات (LC) **ذبذبات كهرومغناطيسية**. لفهم الذبذبات الكهرومغناطيسية، ففكر في دائرة بسيطة ذات مسار واحد تحتوي على محث ومكثف (الشكل 10.2). تذكر أننا نحصل على الطاقة المخزنة في المجال الكهربائي لمكثف سعته C من خلال المعادلة التالية (انظر الوحدة 4)

$$U_E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

حيث q مقدار الشحنة على أحد لوحي المكثف. كما نحصل على الطاقة المخزنة في المجال المغناطيسي لحث معامل حثه L من خلال المعادلة التالية (انظر الوحدة 9)

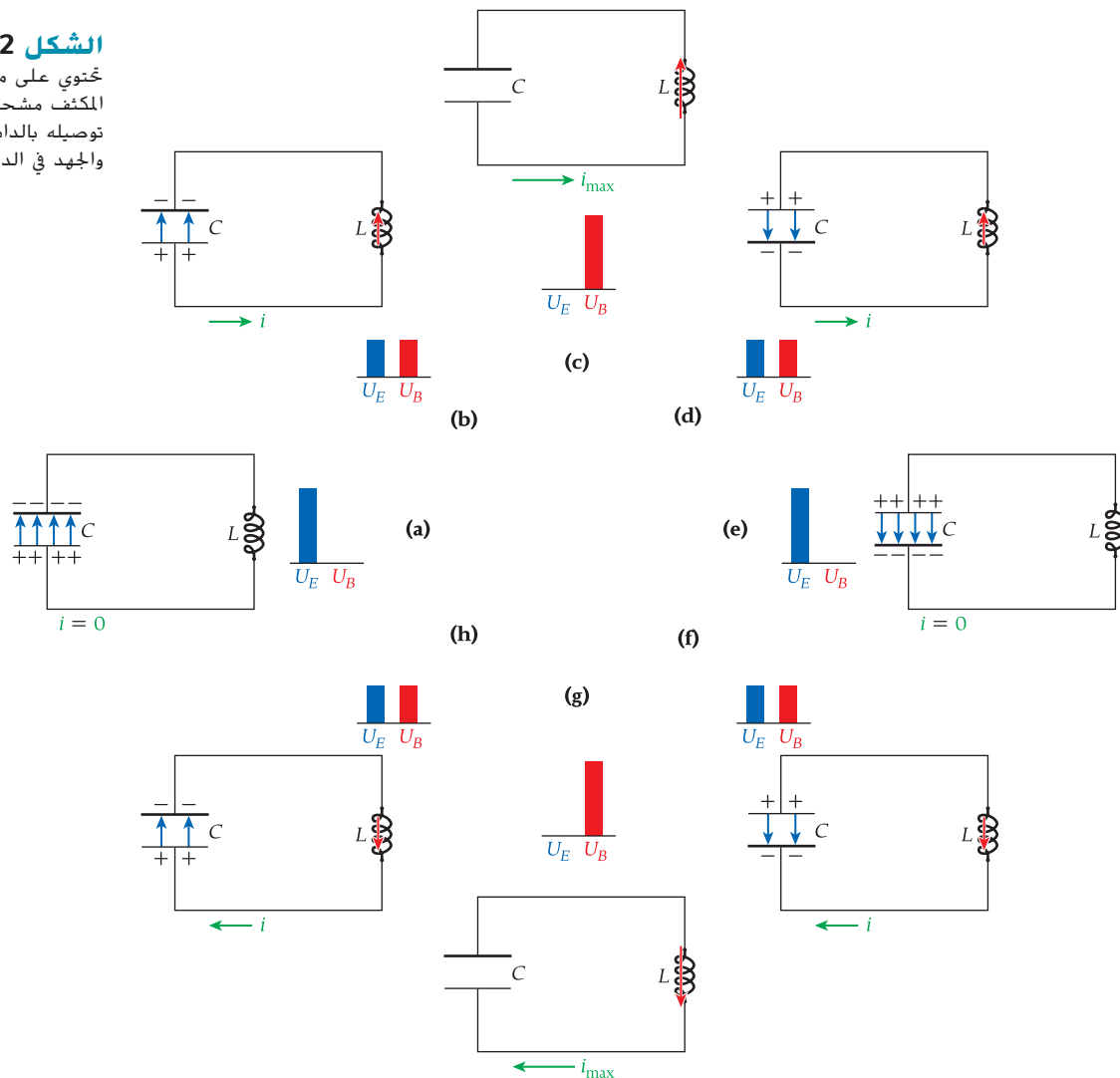
$$U_B = \frac{1}{2} Li^2$$

حيث i التيار المتدفق في الحث. يوضح الشكل 10.2 كيفية تغير هاتين الطائفتين مع الزمن في دائرة الحث والمكثف هذه. لعل هذا الشكل يُذكرك بطاقة الوضع والطاقة الحركية كدالة زمن لكتلة متأرجحة (متذبذبة) في الزنبرك. ليس هذا التشابه مجرد صدفة! فمعظم الأوصاف الرياضية للموجات الكهرومغناطيسية في هذه الوحدة تتبع بدقة الأوصاف الرياضية للموجات الميكانيكية. في الشكل 10.2a، يكون المكثف مشحونًا بالكامل في البداية (مع وجود الشحنة الموجبة على اللوح السفلي) ثم يوصل بالدائرة. في هذا الوقت، تكون طاقة الدائرة موجودة بالكامل في المجال المغناطيسي للمكثف. ويبدأ المكثف في تفريغ الشحنة عبر الحث في الشكل 10.2b. عند هذه النقطة، يتدفق التيار عبر الحث، ما يؤدي إلى توليد مجال مغناطيسي. (يوجد سهم أخضر أو تسمية أسفل الرسم التخطيطي



عدّد بعض الأجهزة في حياتنا اليومية التي تستخدم أجهزة الإستشعار. ما نوع المعلومات التي يمكن ان تجمعها أجهزة الإستشعار؟

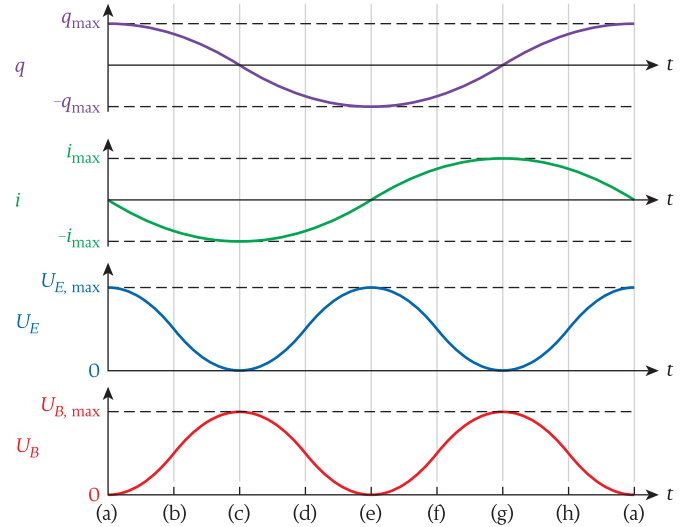
الشكل 10.2 دائرة مسار واحد تحتوي على مكثف ومحث. (a) يكون المكثف مشحونًا بالكامل في البداية عند توصيله بالدائرة. (b)-(h) يتذبذب التيار والجهد في الدائرة مع مرور الزمن.



لكل دائرة لتوضيح اتجاه التيار اللحظي i ومقداره) ثم يُخزّن جزء من طاقة الدائرة في المجال الكهربائي للمكثف، ويخزّن جزء في المجال المغناطيسي للمحث. ويبدأ التيار في الوصول إلى مستوى الثبات لأن المجال المغناطيسي المتزايد للمحث يستحث قوة دافعة كهربائية معاكسة للتيار. في الشكل 10.2c، تفرّغت شحنة المكثف بالكامل، ويتدفق أقصى تيار عبر الحث. (عندما يكون مقدار i عند أقصى قيمة له، يُشار إليه بـ i_{\max} كما في الشكل). وأصبحت كل طاقة الدائرة مخزنة الآن في المجال المغناطيسي للمحث. لكن يستمر التيار في التدفق، ويقل مقداره عن القيمة القصوى له، فيقل المجال المغناطيسي للمحث. أما في الشكل 10.2d، فيبدأ المكثف في الشحن بالطاقة المعاكسة (الشحنة الموجبة على اللوح العلوي). ثم تُخزّن الطاقة مرة أخرى في المجال الكهربائي للمكثف، وفي المجال المغناطيسي للمحث. في الشكل 10.2e، أصبحت طاقة الدائرة موجودة بالكامل في المجال المغناطيسي للمكثف مرة أخرى. لاحظ أن المجال الكهربائي الآن في اتجاه معاكس لاتجاه المجال الأصلي في الشكل 10.2a. وأصبحت قيمة التيار صفراً، وكذا قيمة المجال المغناطيسي في الحث. في الشكل 10.2f، يبدأ المكثف في تفريغ الشحنة مرة أخرى، ما ينتج تياراً يتدفق في الاتجاه المعاكس لاتجاه التيار الموضح في الأجزاء من (b) إلى (d) من الشكل. فينتج هذا التيار مجالاً مغناطيسياً في الاتجاه المعاكس في الحث. ومرة أخرى، يُخزّن جزء من الطاقة في المجال الكهربائي، ويخزّن جزء منها في المجال المغناطيسي. في الشكل

10.2g. تصبح الطاقة كلها مخزنة في المجال المغناطيسي للحث، ويكون المجال المغناطيسي في الاتجاه المعاكس لما كان عليه في الشكل 10.2c. ويتدفق أقصى تيار في الاتجاه المعاكس لما كان عليه في الشكل 10.2c. وفي الشكل 10.2h، يبدأ المكثف في الشحن مرة أخرى، ما يعني وجود طاقة في كل من المجالين الكهربائي والمغناطيسي. ثم تعود الدائرة إلى حالتها التي كانت عليها في الشكل 10.2a. وتستمر الدائرة في التذبذب بشكل لا نهائي لعدم احتوائها على مقاوم، كما يعمل المجالان الكهربائي والمغناطيسي معًا على حفظ طاقة الدائرة. في الواقع، لن يستمر تذبذب الدائرة المحتوية على مكثف ومحث إلى ما لا نهاية؛ بل تتضاءل هذه التذبذبات مع الزمن بسبب وجود مقاومة صغيرة في الدائرة (راجع القسم 10.3) أو إشعاع كهرومغناطيسي.

إن الشحنة على أي من لوحَي المكثف والتيار في دائرة الحث والمكثف يتغيران تغيرًا جيبياً كما هو موضح في الشكل 10.3. حيث يشير q_{\max} إلى أقصى شحنة على لوح المكثف الذي سُحِن بشحنة موجبة في البداية (اللوح السفلي في الشكل 10.2a). وتعتمد الطاقة في المجال الكهربائي على مربع الشحنة الموجودة في المكثف، بينما تعتمد الطاقة في المجال المغناطيسي على مربع التيار الموجود في الحث. وهكذا، فإن الطاقة الكهربائية U_E والطاقة المغناطيسية U_B تتغيران بين الصفر والقيمة القصوى لكل منهما كدالة للزمن.



الشكل 10.3 التغير في الشحنة، والتيار، والطاقة الكهربائية، والطاقة المغناطيسية كدالة زمن لدائرة مسار واحد محتوية على محث ومكثف. تشير الأحرف الموجودة في الجزء السفلي إلى الحالات في الشكل 10.2.

10.2 تحليل ذبذبات دائرة الحث والمكثف Analysis of LC Oscillations

لنحدّد الآن كميات الظواهر التي تمّ توضيحها في القسم السابق. افترض دائرة ذات مسار واحد تحتوي على مكثف سعته C ومحث مقدار حثه L . لكن لا تحتوي على مقاوم ولا يحدث فقد بالمقاومة في سلك الدائرة. كما هو موضح في الشكل 10.4. يمكننا كتابة الطاقة الكلية في الدائرة، U ، كمجموع الطاقة الكهربائية في المكثف والطاقة المغناطيسية في الحث:

$$U = U_E + U_B$$

باستخدام تعبيرَي الطاقة الكهربائية والمغناطيسية بدلالة الشحنة والتيار $U_E = \frac{1}{2}(q^2/C)$ و $U_B = \frac{1}{2}Li^2$ نحصل على

$$U = U_E + U_B = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} + \frac{1}{2}Li^2$$

لأننا افترضنا أن المقاومة تساوي صفرًا، فلا يمكن أن تُفقد طاقة في صورة حرارة، وستظل الطاقة في الدائرة ثابتة، حيث يعمل المجالان الكهربائي والمغناطيسي معًا على حفظ الطاقة. ومن ثمّ فإن مشتقة الطاقة بالنسبة إلى الزمن في الدائرة تساوي صفرًا:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}\frac{q^2}{C} + \frac{1}{2}Li^2\right) = \frac{q}{C}\frac{dq}{dt} + Li\frac{di}{dt} = 0$$

وفقًا للتعريف، التيار هو مشتقة الشحنة بالنسبة للزمن، $i = dq/dt$. ولذلك، فإن مشتقة التيار بالنسبة للزمن هي المشتقة الثانية للشحنة بالنسبة للزمن:

$$\frac{di}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{dq}{dt}\right) = \frac{d^2q}{dt^2}$$

من خلال هذه المعادلة لـ di/dt ، فإن المعادلة السابقة لمشتقة الطاقة الكلية بالنسبة للزمن، dU/dt ، ستصبح

$$\frac{q}{C}\frac{dq}{dt} + L\frac{dq}{dt}\frac{d^2q}{dt^2} = \frac{dq}{dt}\left(\frac{q}{C} + L\frac{d^2q}{dt^2}\right) = 0$$

يمكننا إعادة كتابة هذه المعادلة كما يلي

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{LC} = 0 \quad (10.1)$$

مراجعة المفاهيم 10.1

يوضح الشكل 10.2a أن شحنة المكثف في دائرة الحث والمكثف تصل إلى أقصى قيمة لها عندما تكون قيمة التيار صفرًا. ماذا عن فرق الجهد عبر المكثف؟

(a) يصل فرق الجهد عبر المكثف إلى أقصى قيمة له عند مرور أقصى تيار.

(b) يصل فرق الجهد عبر المكثف إلى أقصى قيمة له عندما تكون الشحنة عند أقصى قيمة لها.

(c) لا يتغير فرق الجهد عبر المكثف.



الشكل 10.4 دائرة مسار واحد محتوية على محث ومكثف.

(نتجاهل الحل $dq/dt = 0$ لأنه يتوافق مع حالة عدم وجود شحنة على المكثف في البداية). هذه المعادلة التفاضلية لها الصيغة نفسها لمعادلة الحركة التوافقية البسيطة، التي تصف الموقع، x ، لجسم كتلته m متصل بزنبرك ثابتته k :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$$

نعلم أن حل هذه المعادلة التفاضلية لإيجاد الموقع كدالة للزمن هو دالة جيبية: $x = x_{\max} \cos(\omega_0 t + \phi)$ ، حيث ϕ ثابت الطور، ونحصل على التردد الزاوي، ω_0 ، من خلال $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ بالتعويض بـ q عن x وبـ $1/LC$ عن k/m في المعادلة التفاضلية للحركة التوافقية البسيطة، نصل إلى الحل المماثل للمعادلة 10.1. ومن ثمَّ نحصل على الشحنة كدالة للزمن في دائرة الحث والمكثف من خلال المعادلة

$$(10.2) \quad q = q_{\max} \cos(\omega_0 t - \phi)$$

حيث q_{\max} مقدار أقصى شحنة في الدائرة، و ϕ ثابت الطور، الذي تحدده الظروف الأولية لحالة معينة. (لاحظ أن مبدأ الدذبذبات الكهرومغناطيسية هو استخدام الإشارة السالبة قبل ϕ). نحصل على التردد الزاوي من خلال المعادلة

$$(10.3) \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

نحصل على التيار من خلال مشتقة الزمن للمعادلة 10.2:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(q_{\max} \cos(\omega_0 t - \phi)) = -\omega_0 q_{\max} \sin(\omega_0 t - \phi)$$

بما أن أقصى تيار في الدائرة هو $i_{\max} = \omega_0 q_{\max}$ ، فإننا نحصل على

$$(10.4) \quad i = -i_{\max} \sin(\omega_0 t - \phi)$$

تتوافق المعادلتان 10.2 و 10.4 مع المنحنيين العلويين في الشكل 10.3 مع $\phi = 0$. يمكننا أن نكتب تعبيرَي الطاقة الكهربائية والطاقة المغناطيسية كدالتين للزمن:

$$U_E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2} \frac{[q_{\max} \cos(\omega_0 t - \phi)]^2}{C} = \frac{q_{\max}^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t - \phi)$$

9

$$U_B = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{L}{2} [-i_{\max} \sin(\omega_0 t - \phi)]^2 = \frac{L}{2} i_{\max}^2 \sin^2(\omega_0 t - \phi)$$

بما أن $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ و $i_{\max} = \omega_0 q_{\max}$ ، يمكننا أن نكتب

$$\frac{L}{2} i_{\max}^2 = \frac{L}{2} \omega_0^2 q_{\max}^2 = \frac{q_{\max}^2}{2C}$$

إذًا، يمكننا التعبير عن الطاقة المغناطيسية كدالة للزمن على النحو التالي:

$$U_B = \frac{q_{\max}^2}{2C} \sin^2(\omega_0 t - \phi)$$

لاحظ أن لكل من الطاقة الكهربائية والطاقة المغناطيسية قيمة قصوى تساوي $q_{\max}^2/(2C)$ ، وقيمة دنيا تساوي صفرًا.

يمكننا الحصول على تعبير للطاقة الكلية في الدائرة، U . يجمع الطاقة الكهربائية والطاقة المغناطيسية، ثم استخدام المتطابقة المثلثية $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$:

$$\begin{aligned} U = U_E + U_B &= \frac{q_{\max}^2}{2C} \cos^2(\omega_0 t - \phi) + \frac{q_{\max}^2}{2C} \sin^2(\omega_0 t - \phi) \\ &= \frac{q_{\max}^2}{2C} [\sin^2(\omega_0 t - \phi) + \cos^2(\omega_0 t - \phi)] \\ &= \frac{q_{\max}^2}{2C} = \frac{L}{2} i_{\max}^2 \end{aligned}$$

وهكذا، تظل الطاقة الكلية في الدائرة ثابتة مع الزمن وتتناسب طرديًا مع مربع الشحنة الأصلية الموجودة في المكثف.

مراجعة المفاهيم 10.2

في الشكل 10.3، إذا افترضنا أن $t = 0$ عند النقطة (c)، فما قيمة ثابت الطور في هذه الحالة؟ (باعتبار أن التيار الساري في اتجاه عقارب الساعة موجب).

$$0 \text{ (a)} \quad 3\pi/2 \text{ (d)}$$

$$\pi/2 \text{ (b)} \quad \text{e) لا شيء مما سبق}$$

$$\pi \text{ (c)}$$

مثال 10.1 خصائص دائرة الحث والمكثف (LC)

تحتوي دائرة على مكثف سعته $C = 1.50 \mu\text{F}$ ومحث مقدار حثه $L = 3.50 \text{ mH}$ (الشكل 10.4). وتم شحن المكثف بالكامل باستخدام بطارية جهدها 12.0 V ثم تم توصيله بالدائرة.

المسألة

ما التردد الزاوي للدائرة؟ ما الطاقة الكلية في الدائرة؟ ما الشحنة الموجودة في المكثف بعد $t = 2.50 \text{ s}$ ؟

الحل

نحصل على التردد الزاوي للدائرة من خلال

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{(3.50 \times 10^{-3} \text{ H})(1.50 \times 10^{-6} \text{ F})}} = 1.38 \times 10^4 \text{ rad/s}$$

الطاقة الكلية في الدائرة تساوي

$$U = \frac{q_{\max}^2}{2C}$$

أقصى شحنة في المكثف تساوي

$$\begin{aligned} q_{\max} &= CV_{\text{emf}} = (1.50 \times 10^{-6} \text{ F})(12.0 \text{ V}) \\ &= 1.80 \times 10^{-5} \text{ C} \end{aligned}$$

إذا يمكننا حساب الطاقة الابتدائية المخزنة في المجال الكهربائي للمكثف، وهي تماثل الطاقة الكلية في الدائرة:

$$U = \frac{q_{\max}^2}{2C} = \frac{(1.80 \times 10^{-5} \text{ C})^2}{2(1.50 \times 10^{-6} \text{ F})} = 1.08 \times 10^{-4} \text{ J}$$

نحصل على شحنة المكثف كدالة للزمن من خلال

$$q = q_{\max} \cos(\omega_0 t - \phi)$$

لإيجاد الثابت ϕ ، يجب أن نتذكر أن $q = q_{\max}$ عند $t = 0$ ، إذا

$$q(0) = q_{\max} = q_{\max} \cos[(\omega_0)(0) - \phi] = q_{\max} \cos(-\phi) = q_{\max} \cos \phi$$

هكذا، نجد أن $\phi = 0$ ، ويمكننا كتابة الشحنة كدالة للزمن على النحو التالي:

$$q = q_{\max} \cos \omega_0 t$$

بالتعويض بالقيم $q_{\max} = 1.80 \times 10^{-5} \text{ C}$ ، $\omega_0 = 1.38 \times 10^4 \text{ rad/s}$ و $t = 2.50 \text{ s}$ ، نحصل على

$$q = (1.80 \times 10^{-5} \text{ C}) \cos[(1.38 \times 10^4 \text{ rad/s})(2.50 \text{ s})] = 1.02 \times 10^{-5} \text{ C}$$

سؤال الاختبار الذاتي 10.1

دائرة محث ومكثف تردد تذبذبها يساوي 200.0 kHz . إذا وصلت شحنة المكثف الموجبة إلى أقصى قيمة لها على اللوح السفلي عند $t = 0$ ، وحدد ما إذا كانت كل عبارة من العبارات التالية صوابًا أم خطأ.

(a) عند $t = 2.50 \mu\text{s}$ ، تصل الشحنة على اللوح السفلي إلى أقصى قيمة سالبة لها.

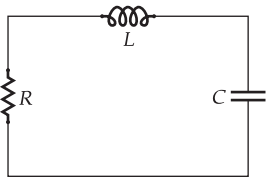
(b) عند $t = 5.00 \mu\text{s}$ ، يصل تيار الدائرة إلى أقصى قيمة له.

(c) عند $t = 2.50 \mu\text{s}$ ، تُخزن طاقة الدائرة بالكامل في الحث.

(d) عند $t = 1.25 \mu\text{s}$ ، يُخزن نصف طاقة الدائرة في المكثف، ويُخزن نصفها الآخر في الحث.

10.3 الذبذبات المتخامدة في دائرة الحث والمكثف والمقاوم Damped Oscillations in an RLC Circuit

لنفكر الآن في دائرة ذات مسار واحد تحتوي على مكثف ومحث إلى جانب مقاوم — دائرة محث ومكثف ومقاوم (RLC)، كما هو موضح في الشكل 10.5. رأينا في القسم السابق أن طاقة الدائرة التي تحتوي على مكثف ومحث تظل ثابتة، وأن الطاقة تتحول من الطاقة الكهربائية إلى المغناطيسية وتعود إلى



طاقة كهربائية مرة أخرى من دون فقدان لها. لكن إذا كانت الدائرة محتوية على مقاوم، فإن تدفق التيار يتسبب في حدوث فقد طاقة في المقاوم، الذي يظهر في صورة طاقة حرارية. ومن ثمَّ تقل طاقة الدائرة بسبب هذا الفقد. نحصل على معدل فقد الطاقة من خلال المعادلة

$$\frac{dU}{dt} = -i^2 R$$

يمكننا إعادة كتابة التغير في الطاقة في الدائرة كدالة للزمن:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{q}{C} \frac{dq}{dt} + Li \frac{di}{dt} = -i^2 R$$

مرة أخرى، بما أن $i = dq/dt$ و $di/dt = d^2q/dt^2$ ، فيمكننا أن نكتب

$$\frac{q}{C} \frac{dq}{dt} + Li \frac{di}{dt} + i^2 R = \frac{q}{C} \frac{dq}{dt} + L \frac{dq}{dt} \frac{d^2q}{dt^2} + \left(\frac{dq}{dt}\right)^2 R = 0$$

أو

$$(10.5) \quad \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0$$

حل هذه المعادلة التفاضلية (للتساؤل الصغير، أي قيم صغيرة كافية للمقاومة) هو

$$(10.6) \quad q = q_{\max} e^{-Rt/2L} \cos \omega t$$

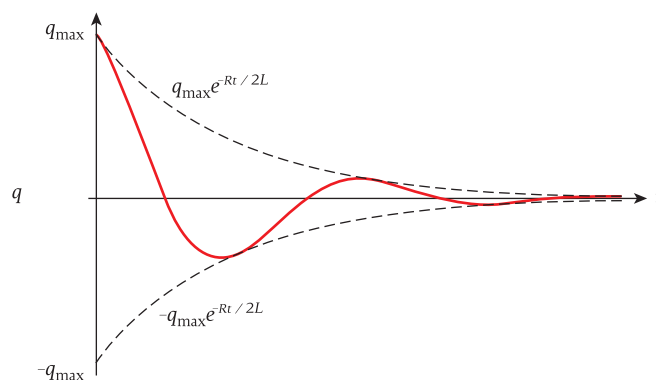
حيث

$$(10.7) \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

لا يظهر حساب التفاضل المستخدم للوصول إلى الحل في المعادلة 10.6. يمكنك التحقق من أن الحل يحقق المعادلة 10.5 عن طريق التعويض المباشر من المعادلتين 10.6 و 10.7 في المعادلة 10.5. كما يمكنك الرجوع إلى، حيث تبين أن معادلة الحركة لمولد الذبذبات الميكانيكية ضعيفة المضائلة (أو المضائلة دون الحرجة) لها حل مماثل.

إذا شُحن المكثف في دائرة المسار الواحد المحتوية على مكثف ومحث ومقاوم في الشكل 10.5 ثم وُضِّل بالدائرة، فستتغير شحنة المكثف جيبيًا مع الزمن مع انخفاض سعتها (الشكل 10.6). يُظهر حساب مشتقة المعادلة 10.6 أن التيار $i = dq/dt$ له سعة تتضاءل بالمعدل نفسه الذي تتضاءل به الشحنة، وأن هذه السعة تتغير جيبيًا مع الزمن. بعد مرور بعض الوقت، لا يتبقى أي تيار في الدائرة.



الشكل 10.6 تمثيل بياني لشحنة المكثف كدالة زمن في دائرة محتوية على مكثف ومحث ومقاوم.

الشكل 10.5 دائرة مسار واحد محتوية على محث ومكثف ومقاوم.

سؤال الاختبار الذاتي 10.2

قارن بين المعادلة 10.5 للشحنة على المكثف كدالة زمن والمعادلة التفاضلية لموقع الكتلة على الزنبرك التي سبق توضيحها في الوحدة 14:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0$$

ما الكمية في دائرة الحث والمكثف والمقاوم التي تمثل دور الكتلة m ، وأيها خاصة بثابت الزنبرك k ، وأيها خاصة بثابت المضائلة b ؟

مراجعة المفاهيم 10.3

ما شرط المضائلة الصغيرة الذي يجب تحقيقه حتى تصبح المعادلة 10.6 للمعادلة 10.5؟ (تلميح: بإمكانك معرفة ذلك من خلال المقارنة بالذبذبة المضائلة لكتلة على

زنبرك معادلتها التفاضلية هي

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0 \text{ وشرط}$$

المضائلة الصغيرة لها هو $b < 2\sqrt{mk}$. أو يمكنك استخدام التحليل التبعدي).

a) $R < 2\sqrt{L/C}$

b) $R < \sqrt{2C/L}$

c) $R < \sqrt{2LC}$

يمكننا تحليل الطاقة في الدائرة كدالة للزمن عن طريق حساب الطاقة المخزنة في المجال الكهربائي للمكثف:

$$U_E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{q_{\max}^2}{2C} e^{-Rt/L} \cos^2 \omega t$$

إذًا، يتناقص كل من U_E و U_B أسياً مع الزمن، لذا نقل الطاقة الكلية في الدائرة، $U_E + U_B$.

10.4 عمل دوائر التيار المتردد Driven AC Circuits

حتى الآن، درسنا الدوائر التي تحتوي على مصدر للقوة الدافعة الكهربائية الثابتة أو التي تبدأ بشحنة ثابتة وتحتوي على طاقة تتذبذب بعد ذلك بين المجالين الكهربائي والمغناطيسي. لكن تحدث العديد من التأثيرات المثيرة في الدائرة التي يتذبذب فيها التيار باستمرار. لندرس بعض هذه التأثيرات، بدءاً من مصدر القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن، ثم التفكير في المقاوم والمكثف والحث المتصلين بهذا المصدر.

القوة الدافعة الكهربائية المترددة

يمكن أن يكون مصدر القوة الدافعة الكهربائية قادراً على إنتاج جهد متغير مع الزمن، على عكس مصادر القوة الدافعة الكهربائية الثابتة التي تم تناولها في الوحدات السابقة. سنفترض أن مصدر القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن يعطي جهداً جيبيًا كدالة للزمن، إذاً سنحصل على القوة الدافعة الكهربائية من خلال المعادلة

$$(10.8) \quad V_{\text{emf}} = V_{\max} \sin \omega t$$

حيث ω التردد الزاوي للقوة الدافعة الكهربائية، و V_{\max} أقصى سعة أو قيمة القوة الدافعة الكهربائية. سيتغير التيار المستحث في دائرة تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن أيضًا تغيرًا جيبيًا مع الزمن. ويسمى هذا التيار المتغير مع الزمن **التيار المتردد**. لكن قد لا يظل التيار المتردد في الطور نفسه دائمًا مع القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن. نحصل على التيار i ، كدالة للزمن من خلال المعادلة

$$(10.9) \quad i = I \sin(\omega t - \phi)$$

حيث I سعة التيار، والتردد الزاوي للتيار المتغير مع الزمن يماثل التردد الزاوي للقوة الدافعة الكهربائية، وثابت الطور ϕ لا يساوي صفرًا. لاحظ، وفقًا للمبدأ، أن ثابت الطور يُسبق بإشارة سالبة.

دائرة مقاوم أومي

لنبدأ تحليل دوائر الحث والمكثف والمقاوم (RLC) المحتوية على تيار متردد بدراسة دائرة تحتوي فقط على مقاوم ومصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن (الشكل 10.7). إذا طبقنا قانون كيرشوف للمسارات على هذه الدائرة، فسنحصل على

$$V_{\text{emf}} - v_R = 0$$

حيث v_R انخفاض الجهد عبر المقاوم. بالتعويض بـ v_R عن V_{emf} في المعادلة 10.8، نحصل على

$$v_R = V_{\max} \sin \omega t = V_R \sin \omega t$$

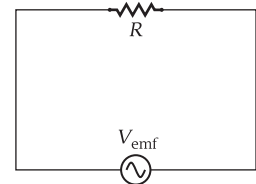
حيث V_R أقصى انخفاض للجهد عبر المقاوم. لاحظ أن الجهد كدالة للزمن يُمثل بحرف v صغير، وأن القيمة العظمى للجهد تُمثل بحرف V كبير. وفقًا لقانون أوم، $V = iR$ ، لذا يمكننا أن نكتب

$$(10.10) \quad i_R = \frac{v_R}{R} = \frac{V_R}{R} \sin \omega t = I_R \sin \omega t$$

إذًا، ترتبط القيمة العظمى للتيار والقيمة العظمى للجهد بالمعادلة التالية:

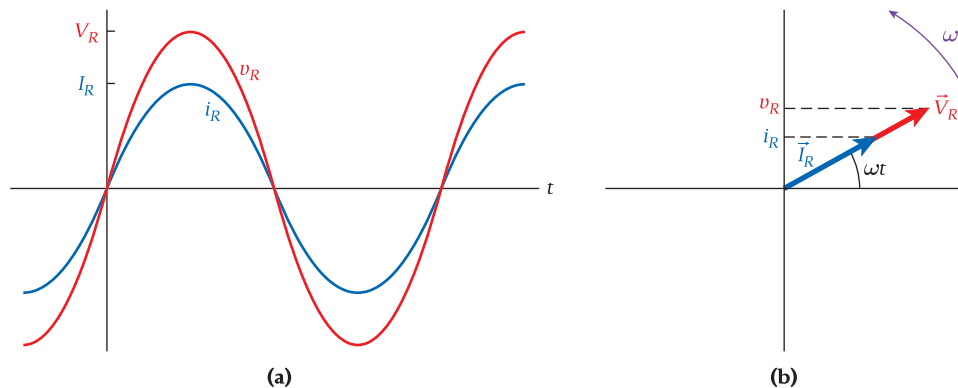
$$(10.11) \quad V_R = I_R R$$

يُظهر الشكل 10.8a الجهد عبر المقاوم والتيار المار فيه كدالة للزمن. يمكن تمثيل التيار المتغير مع الزمن باستخدام متجه طوري، \vec{I}_R ، وتمثيل الجهد المتغير مع الزمن باستخدام متجه طوري، \vec{V}_R .



الشكل 10.7 دائرة مسار واحد تحتوي على مقاوم ومصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن.

الشكل 10.8 جهد و تيار مترددان في دائرة مسار واحد محتوية على مقاوم ومصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن: (a) الجهد والتيار كدالتين للزمن؛ (b) متجهان طوريان يمثلان الجهد والتيار ويوضحان أنهما متفتقان في الطور.



(الشكل 10.8b). **المتجه الطوري** هو متجه يدور عكس اتجاه عقارب الساعة (يكون ذيله ثابتاً عند نقطة الأصل) يمثل إسقاطه على المحور الرأسي التغير الجيبي لكمية معينة في الزمن. والسرعة الزاوية للمتجهات الطورية في الشكل 10.8b هي ω في المعادلة 10.10. والتيار المتدفق عبر المقاوم والجهد المار عبر المقاوم متفتقان في الطور، ما يعني أن فرق الطور بين التيار والجهد يساوي صفراً.

دائرة مكثف

لندرس الآن الدائرة التي تحتوي على مكثف ومصدر قوة دافعة وكهربائية متغيرة مع الزمن (الشكل 10.9). نحصل على الجهد عبر المكثف من خلال قانون كيرشوف للمسارات،

$$V_{\text{emf}} - v_C = 0$$

حيث v_C انخفاض الجهد عبر المكثف. ومن ثمَّ نحصل على

$$v_C = V_{\text{max}} \sin \omega t = V_C \sin \omega t$$

حيث V_C أقصى جهد عبر المكثف. بما أن $q = CV$ للمكثف، يمكننا أن نكتب

$$q = C v_C = C V_C \sin \omega t$$

لكننا نريد تعبيراً للتيار (بدلاً من الشحنة) كدالة للزمن. لذلك، نحسب المشتقة بالنسبة إلى زمن المعادلة السابقة:

$$i_C = \frac{dq}{dt} = \frac{d(CV_C \sin \omega t)}{dt} = \omega C V_C \cos \omega t$$

يمكن كتابة هذه المعادلة بصيغة تعادل صيغة المعادلة 10.10 وفقاً لقانون أوم ومن خلال تحديد كمية ماثلة للمقاومة تسمى **المفاعلة السَّعوية**، X_C :

$$(10.12)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

يسمح لنا هذا التعريف بالتعبير عن التيار i_C على النحو التالي

$$i_C = \frac{V_C}{X_C} \cos \omega t$$

أو بالصيغة $i_C = I_C \cos \omega t$ ، على النحو

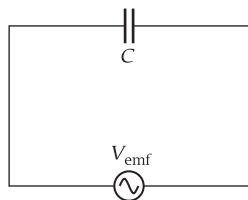
$$i_C = I_C \cos \omega t$$

يمكننا استخدام $\cos \theta = \sin(\theta + \pi/2)$ للتعبير عن هذه النتيجة بصيغة مشابهة لصيغة المعادلة 10.10:

$$(10.13)$$

$$i_C = I_C \sin(\omega t + \pi/2)$$

تستخدم هذه المعادلة لإيجاد التيار المتدفق في الدائرة التي تحتوي على مكثف فقط مع تعبير إيجاد التيار المتدفق في الدائرة التي تحتوي على مقاوم فقط. بخلاف أن التيار والجهد مختلفا الطور بفرق طور مقداره $\pi/2$ rad (90°). يوضح الشكل 10.10a الجهد والتيار كدالتين للزمن.

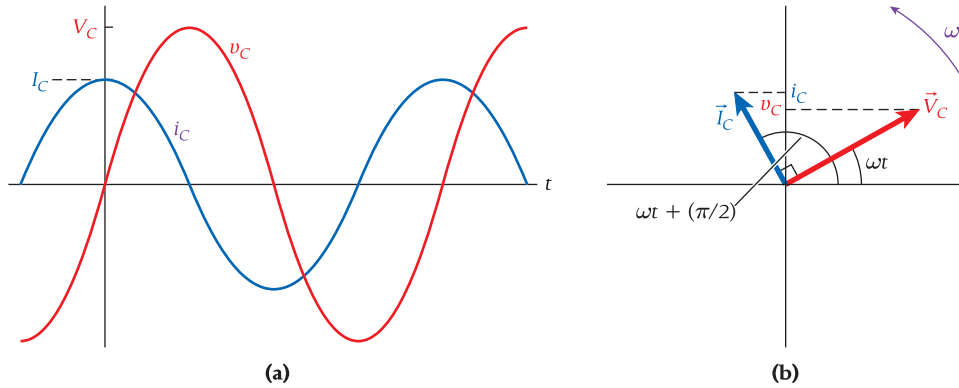


الشكل 10.9 دائرة مسار واحد تحتوي على مكثف ومصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن.

مراجعة المفاهيم 10.4

دائرة تحتوي على مكثف (الشكل 10.9) مزودة بمصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن يعطي جهداً يتحدد من العلاقة $v_C = V_C \sin \omega t$. إذا وصل فرق الجهد عبر المكثف إلى أقصى قيمة له ($v_C = V_{\text{max}}$)، فما مقدار التيار i_C المار عبره؟

- $i_C = 0$
- $i_C = +I_{\text{max}}$
- $i_C = -I_{\text{max}}$



الشكل 10.10 جهد و تيار مترددان في دائرة مسار واحد محتوية على مكثف ومصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن: (a) الجهد والتيار كدالتين للزمن؛ (b) متجهان طوريان يمثلان الجهد والتيار يوضحان أنهما مختلفا الطور بفرق طور مقداره $\pi/2$ rad (90°).

يشير المتجهان الطوريان المتناظران \vec{I}_C و \vec{V}_C الموضحان في الشكل 10.10b، إلى أنه بالنسبة إلى الدائرة المحتوية على مكثف فقط، يسبق التيار الجهد. ترتبط سعة الجهد عبر المكثف بسعة التيار عبر المكثف من خلال المعادلة

$$(10.14) \quad V_C = I_C X_C$$

تشبه هذه المعادلة قانون أوم، مع استبدال المفاعلة السعوية بالمقاومة. وأحد الاختلافات الرئيسية بين المفاعلة السعوية والمقاومة هو اعتماد المفاعلة السعوية على التردد الزاوي للقوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن.

دائرة محث نقي

لندرس الآن الدائرة المحتوية على مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن ومحث نقي (الشكل 10.11). نطبق قانون كيرشوف للمسارات مرة أخرى على هذه الدائرة للحصول على الجهد عبر المحث:

$$v_L = V_{\max} \sin \omega t = V_L \sin \omega t$$

حيث V_L أقصى جهد عبر المحث. يستحث التيار المتغير في المحث قوة دافعة كهربائية نحصل عليها من خلال

$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

لاحظ أنه إذا كان di/dt موجباً، فسيكون انخفاض الجهد عبر المحث موجباً لأن اتجاه التيار هو اتجاه الجهد المتناقص. لذا يمكننا كتابة الصيغة التالية

$$L \frac{di_L}{dt} = V_L \sin \omega t$$

أو

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \sin \omega t$$

ما يعنينا الآن هو التيار، لا مشتقته بالنسبة للزمن. لذلك نجري تكاملاً للمعادلة السابقة:

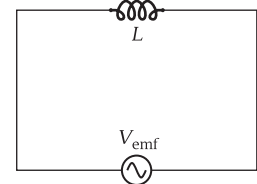
$$i_L = \int \frac{di_L}{dt} dt = \int \frac{V_L}{L} \sin \omega t dt = -\frac{V_L}{\omega L} \cos \omega t$$

نعتبر هنا ثابت التكامل يساوي صفر لأنه لا تعنينا الحلول التي تحتوي على التيار الثابت. نحدد **المفاعلة الحثية**، وفقاً لقانون أوم وبطريقة مماثلة للمقاومة والمفاعلة السعوية، كما يلي

$$(10.15) \quad X_L = \omega L$$

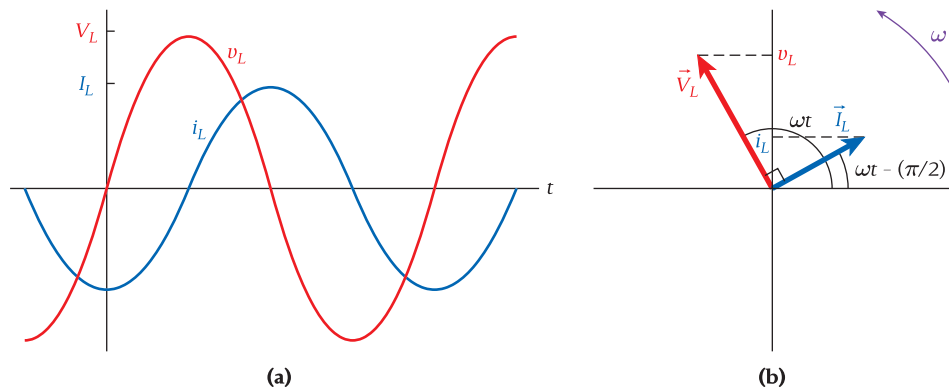
باستخدام المفاعلة الحثية، يمكننا التعبير عن i_L على النحو التالي

$$i_L = -\frac{V_L}{X_L} \cos \omega t = -I_L \cos \omega t$$



الشكل 10.11 دائرة مسار واحد تحتوي على محث ومصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن.

الشكل 10.12 جهد وتيار مترددان في دائرة مسار واحد محتوية على محث ومصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن؛ (a) الجهد والتيار كدالتين للزمن؛ (b) متجهان طوريان يمثلان الجهد والتيار بوضوح أنهما مختلفا الطور بفرق طور مقداره $-\pi/2$ rad (-90°).



حيث I_L أقصى تيار. لذا فإن

$$V_L = I_L X_L$$

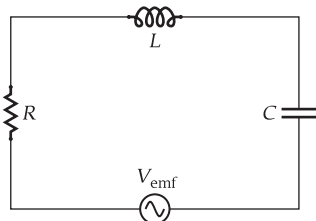
التي تشبه قانون أوم مرة أخرى، باستثناء أن المفاعلة الحثية تعتمد على التردد الزاوي للقوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن.

لأن $-\cos \theta = \sin(\theta - \pi/2)$ ، فيمكننا أن نُعيد كتابة $i_L = -I_L \cos \omega t$ كما يلي:

$$(10.16) \quad i_L = I_L \sin(\omega t - \pi/2)$$

وهكذا، فإن التيار المتدفق في دائرة تحتوي على محث ومصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن يختلف مع الجهد في الطور بفرق طور مقداره $-\pi/2$ rad. يوضح الشكل 10.12a الجهد والتيار كدالتين للزمن. المتجهان الطوريان المتناظران \vec{V}_L و \vec{I}_L موضحان في الشكل 10.12b، الذي يشير إلى أنه في الدائرة المحتوية على محث، يسبق الجهد التيار.

10.5 دائرة محث ومكثف ومقاوم موصلة على التوالي Series RLC Circuit



الشكل 10.13 دائرة مسار واحد محتوية على مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن ومقاوم ومحث ومكثف.

نحن مستعدون الآن لدراسة دائرة ذات مسار واحد تحتوي على كل مكونات الدائرة الثلاثة، إلى جانب مصدر القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن (الشكل 10.13). لن نقدم تحليلاً رياضياً كاملاً لدائرة المحث والمكثف والمقاوم (RLC) هذه، لكننا سنستخدم المتجهات الطورية لتحليل الجوانب المهمة.

يمكن وصف التيار المتغير مع الزمن في دائرة المحث والمكثف والمقاوم البسيطة باستخدام متجه طوري، \vec{I}_m (الشكل 10.14). ويمثل مركبة \vec{I}_m على المحور الرأسي التيار i المتدفق في دائرة كدالة للزمن، t ، حيث نحصل على زاوية المتجه الطوري من خلال $\omega t - \phi$ على هذا النحو

$$i = I_m \sin(\omega t - \phi)$$

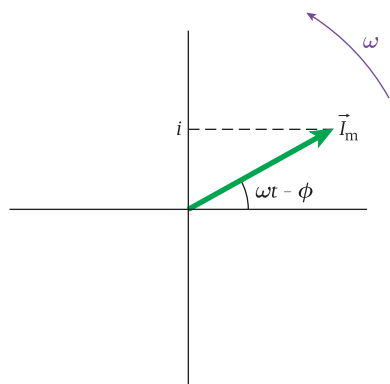
إن التيار i والجهود عبر مكونات الدائرة مختلفة في الطور بالنسبة إلى القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن، كما رأينا في القسم السابق:

- بالنسبة إلى المقاوم، يتفق الجهد v_R والتيار i في الطور، ويتفق المتجه الطوري للجهد \vec{V}_R مع \vec{I}_m في الطور.
- بالنسبة إلى المكثف، يسبق التيار i الجهد v_C بفرق طور مقداره $\pi/2$ rad (90°). لذا فإن للمتجه الطوري للجهد \vec{V}_C زاوية مقدارها $\pi/2$ rad (90°) أقل من زاويتي \vec{V}_R و \vec{I}_m .
- بالنسبة إلى المحث، يلي التيار i الجهد v_L بفرق جهد مقداره $\pi/2$ rad (90°). لذا فإن للمتجه الطوري للجهد \vec{V}_L زاوية مقدارها $\pi/2$ rad (90°) أكبر من زاويتي \vec{V}_R و \vec{I}_m .

نُظهر المتجهات الطورية لدائرة المحث والمكثف والمقاوم في الشكل 10.15. ويمثل الجهد اللحظي عبر كل مكون من خلال مركبة المتجه الطوري لكل مكون على المحور الرأسي. نحصل على انخفاض الجهد الكلي عبر كل المكونات، V ، من خلال المعادلة

$$(10.17) \quad V = v_R + v_C + v_L$$

يمكن اعتبار الجهد الكلي V بمثابة إسقاط على المحور الرأسي للمتجه الطوري \vec{V}_m يمثل القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن في الدائرة (الشكل 10.16). تدور المتجهات الطورية في الشكل 10.15، لذا تكون المعادلة 10.17 صحيحة طوال الوقت. ويجب جمع المتجهات الطورية جمعاً اتجاهياً



الشكل 10.14 المتجه الطوري \vec{I}_m يمثل التيار i المتدفق في دائرة المحث والمكثف والمقاوم (RLC).

لمطابقة \vec{V}_m من أجل تحقيق المعادلة 10.17 خلال الزمن. يوضح الشكل 10.16 هذا الجمع الاتجاهي. في هذا الشكل، تم استبدال مجموع المتجهين الطوريين \vec{V}_L و \vec{V}_C بـ $\vec{V}_L + \vec{V}_C$. ويجب أن يكون مجموع المتجهين $\vec{V}_L + \vec{V}_C$ و \vec{V}_R مساويًا \vec{V}_m . ومن ثمَّ يمكننا أن نكتب

$$(10.18) \quad V_m^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2$$

لأن المتجهين \vec{V}_L و \vec{V}_C يؤثران دائمًا في اتجاهين متعاكسين، \vec{V}_m متعامد عليهما. يمكننا الآن التعويض بالكميات المشتقة مسبقًا لـ V_R و V_L و V_C في المعادلة 10.18. واعتبار القيمة العظمى للتيار في كل المكونات الثلاثة هي I_m لأنها موضوعة على التوالي:

$$V_m^2 = (I_m R)^2 + (I_m X_L - I_m X_C)^2$$

يمكننا بعد ذلك الحل لإيجاد القيمة العظمى للتيار في الدائرة:

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

يسمى المقام في المعادلة السابقة **المعاوقة، Z**:

$$(10.19) \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

تعتمد معاوقة الدائرة على تردد القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن. يتم التعبير عن هذا التغير مع الزمن عند إجراء تعويضات عن المعاوقة السعوية X_C والمعاوقة الحثية X_L :

$$(10.20) \quad Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

وحدة معاوقة دائرة التيار المتردد هي الأوم (Ω). تمامًا مثل المقاومة في دائرة التيار المستمر. ومن ثمَّ يمكننا كتابة

$$(10.21) \quad I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{V_m}{Z}$$

يعتمد التيار المتدفق في دائرة تيار متردد على الفرق بين المعاوقة الحثية والمعاوقة السعوية، ويسمى **المعاوقة الكلية**. ويمكن التعبير عن ثابت الطور ϕ بدلالة هذا الفرق. حيث يُعرَّف ثابت الطور على أنه فرق الطور بين المتجهين الطوريين للجهد \vec{V}_R و \vec{V}_m والموضحين في الشكل 10.16. لذا يمكننا التعبير عن ثابت الطور على النحو التالي

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{V_L - V_C}{V_R} \right)$$

بما أن $V_R = RI_m$ و $V_C = X_C I_m$ و $V_L = X_L I_m$ ، فيمكننا إعادة كتابة ذلك كما يلي:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right)$$

وبالتعويض $X_L = \omega L$ و $X_C = 1/\omega C$ يمكننا بعد ذلك الحصول على تغير التردد لثابت الطور:

$$(10.22) \quad \phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L - (\omega C)^{-1}}{R} \right)$$

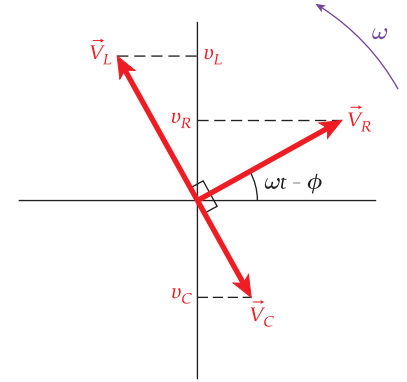
يمكن الآن كتابة التيار في دائرة الحث والمكثف والمقاوم على النحو التالي

$$(10.23) \quad i = I_m \sin(\omega t - \phi)$$

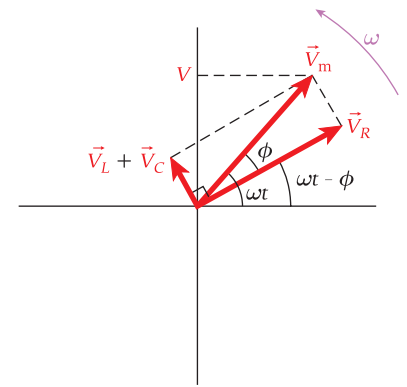
حيث I_m مقدار المتجه الطوري \vec{I}_m . ونحصل على الجهد عبر كل المكونات في الدائرة من خلال مصدر القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن:

$$(10.24) \quad V = V_{emf}(t) = V_m \sin \omega t$$

حيث V_m مقدار المتجه الطوري \vec{V}_m .



الشكل 10.15 المتجهات الطورية للجهد في دائرة توصيل مكثف ومقاوم على التوالي. المتجه الطوري \vec{V}_R يتفق في الطور مع المتجه الطوري \vec{I}_m الذي يمثل التيار المار في الدائرة.



الشكل 10.16 مجموع المتجهات الطورية للجهد في دائرة توصيل مكثف ومقاوم على التوالي.

مراجعة المفاهيم 10.5

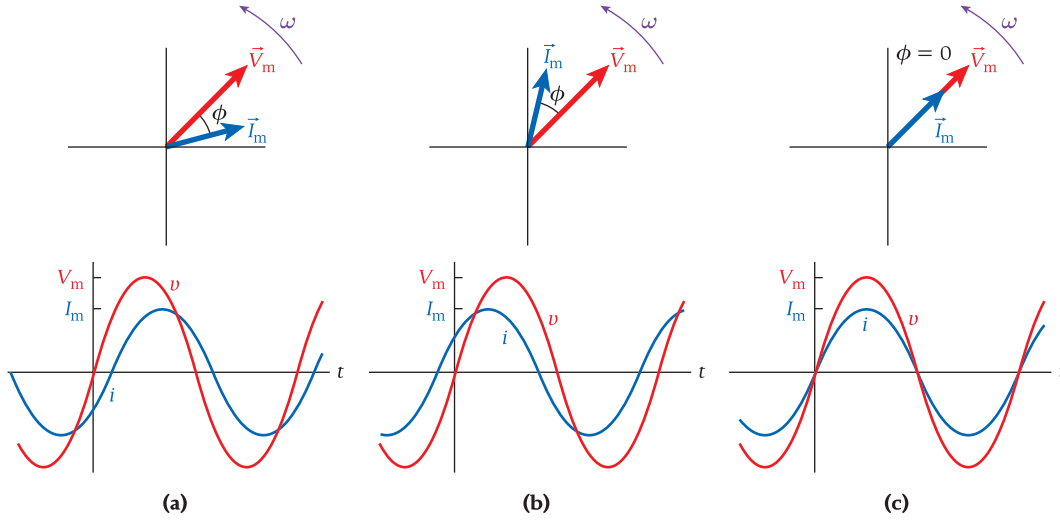
دائرة مثل الموضحة في الشكل 10.13 تحتوي على مكثف ومحث ومقاوم متصلين على التوالي بمصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن مقدارها $V_{emf} = V_m \sin \omega t$. إذا زادت القوة الدافعة الكهربائية V_{emf} عند لحظة زمنية معينة، فماذا سيحدث للتيار المار في الدائرة؟

(a) سيزداد.

(b) سينخفض.

(c) لن يتغير.

(d) قد يزداد أو ينخفض.



الشكل 10.17 التيار والجهد كدالتي زمن لدائرة محث ومكثف ومقاوم عندما: (a) $X_L > X_C$; (b) $X_L < X_C$; و (c) $X_L = X_C$.

سؤال الاختبار الذاتي 10.3

افترض دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي مثل الموضحة في الشكل 10.13. وتعمل الدائرة عند تردد زاوي ω بقوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن. إذا كان تردد الرنين الزاوي هو ω_0 ، وحدّد ما إذا كانت كل عبارة من العبارات التالية صوابًا أم خطأ.

(a) إذا كان $\omega = \omega_0$ ، فإن الجهد والتيار يتفقان في الطور.

(b) إذا كان $\omega < \omega_0$ ، فإن الجهد يلي التيار.

(c) إذا كان $\omega > \omega_0$ ، فإن $X_C > X_L$.

إدًا، ثمة ثلاث حالات ممكنة لدائرة تيار متردد تحتوي على مقاوم ومكثف ومحث موصلين على التوالي:

- إذا كان $X_L > X_C$ ، فإن ϕ موجب، ويلبي التيار الجهد في الدائرة. وهذه الدائرة تشبه الدائرة التي تحتوي على محث فقط، باستثناء أن ثابت الطور ليس بالضرورة أن يكون 90° ($\pi/2$ rad). كما هو موضح في الشكل 10.17a.
- إذا كان $X_L < X_C$ ، فإن ϕ سالب، ويسبق التيار الجهد في الدائرة. وهذه الدائرة تشبه الدائرة التي تحتوي على مكثف فقط، باستثناء أن ثابت الطور ليس بالضرورة أن يكون -90° ($-\pi/2$ rad). كما هو موضح في الشكل 10.17b.
- إذا كان $X_L = X_C$ ، فإن ϕ يساوي صفرًا، ويتفق التيار والجهد في الطور. وهذه الدائرة تشبه الدائرة التي تحتوي على مقاوم فقط، كما هو موضح في الشكل 10.17c. عندما $\phi = 0$ ، يقال إن الدائرة في حالة **رنين**.

تعتمد سعة التيار، I_m ، في دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي على تردد القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن، كما تعتمد على L و C . وإيمعان النظر في المعادلة 10.21، نجد أن أقصى تيار يحدث عندما

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$$

وهو ما يتوافق مع $\phi = 0$ و $X_L = X_C$ والتردد الزاوي، ω_0 ، الذي يحدث عنده أقصى تيار، ويُسمى **تردد الرنين الزاوي** وعنده تكون ω_0 تساوي

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

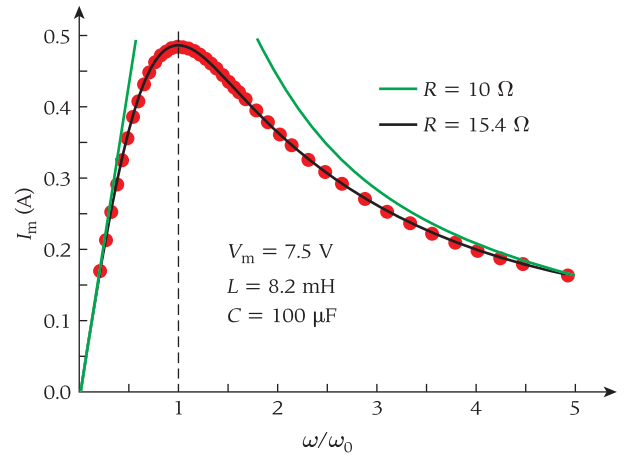
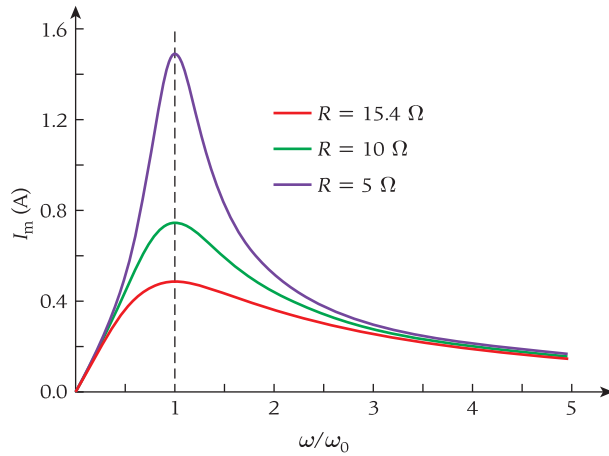
مثال

لنلقِ الآن نظرة على دائرة حقيقية (الشكل 10.18). يوضح الشكل 10.13 رسمًا تخطيطيًا لهذه الدائرة. تحتوي الدائرة على مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن تعطي جهدًا $V_m = 7.5$ V. وفيها محث معامل حثه $L = 8.2$ mH ومكثف سعته $C = 100$ μ F ومقاوم $R = 10$ Ω . وقيس أقصى تيار، I_m ، كدالة لنسبة التردد الزاوي للقوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن إلى تردد الرنين الزاوي، ω_0 (الشكل 10.19). تشير الدوائر الحمراء إلى نتائج القياسات. يحدث أقصى تيار، كما هو متوقع، عند تردد الرنين الزاوي. لكن مع $R = 10$ Ω ، ينتج عن العلاقة بين I_m و ω/ω_0 ، من المعادلة 10.21، المنحنى الأخضر الذي لا يعطي النتائج المقاسة مرة أخرى. لوصف التيار بصورة أفضل، يجب أن نتذكر أنه في الدائرة الحقيقية، يكون للمحث مقاومة حتى عند تردد الرنين. ويتوافق المنحنى الأسود في الشكل 10.19 مع المعادلة 10.21 حيث $R = 15.4$ Ω .

تشبه حالة الرنين لدائرة المحث والمكثف والمقاوم استجابة مولد الذبذبات الميكانيكية المتخامدة. ويوضح الشكل 10.20 أقصى تيار، I_m ، كدالة لنسبة التردد الزاوي للقوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن إلى تردد الرنين الزاوي، ω/ω_0 . لدائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي حيث $V_m =$



الشكل 10.18 دائرة موصولة على التوالي تحتوي على محث معامل حثه 8.2 mH ومقاوم قوته 10 Ω ومكثف سعته 100 μ F.



الشكل 10.19 تمثيل بياني يوضح أقصى قيمة للتيار، I_m ، مقابل نسبة التردد الزاوي، ω ، للقوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن إلى تردد الرنين، ω_0 ، في دائرة الحث والمكثف والمقاوم. تمثل النقاط الحمراء القياسات. ويشرح النص المنحنيات الخضراء والسوداء.

الشكل 10.20 تمثيل بياني يوضح أقصى قيمة للتيار، I_m ، مقابل نسبة التردد الزاوي، ω ، لقوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن إلى تردد الرنين، ω_0 ، في ثلاث دوائر محتوية على محث ومكثف ومقاوم موصلين على التوالي، فيها $L = 8.2 \text{ mH}$ و $C = 100 \text{ uF}$ وثلاث مقاومات مختلفة.

7.5 V و $L = 8.2 \text{ mH}$ و $C = 100 \text{ uF}$ ، وثلاث مقاومات مختلفة. تلاحظ أنه كلما قلت المقاومة، زاد أقصى تيار عند تردد الرنين الزاوي، وتنتج للتيار قيمة قصوى أكثر وضوحاً.

خصائص دائرة الحث والمكثف والمقاوم (RLC)

مثال 10.2

سؤال الاختبار الذاتي 10.4

افترض أن دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي، مثل الدائرة الموضحة في الشكل 10.13، تحتوي على مقاوم $R = 91.0 \text{ Ohm}$ ومكثف سعته $C = 6.00 \text{ uF}$ ومحث معامل حثه $L = 60.0 \text{ mH}$ ، ويبلغ التردد الزاوي لمصدر القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن $\omega = 64.0 \text{ rad/s}$.

المسألة

ما معاوقة هذه الدائرة؟

الحل

نحل هذه المسألة بالتوصل إلى تعبير لإيجاد المعاوقة بدلالة الكميات المعطاة. لكن بدلاً من ذلك، سنحسب العديد من الإجابات العددية المتوسطة للتعرف بدقة على خصائص هذه الدائرة. نحصل على المعاوقة من خلال $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ ولمعرفة الكميات الموجودة في الطرف الأيمن التي لها أكبر تأثير في المعاوقة، سنحسب الكميات كلاً على حدة. المعاوقة الحثية تساوي

$$X_L = \omega L = (64.0 \text{ rad/s})(60.0 \times 10^{-3} \text{ H}) = 3.84 \text{ Ohm}$$

المعاوقة السعوية تساوي

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{(64.0 \text{ rad/s})(6.00 \times 10^{-6} \text{ F})} = 2.60 \text{ kOhm}$$

تلاحظ أن معاوقة هذه الدائرة تعتمد على المعاوقة السعوية عند القيمة المحددة للتردد الزاوي. يسمى هذا النوع من الدوائر بالدوائر السعوية.

بالتعويض بنتائج المعاوقة السعوية والمعاوقة الحثية، يمكننا حساب المعاوقة:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(91.0 \text{ Ohm})^2 + (3.84 \text{ Ohm} - 2.60 \times 10^3 \text{ Ohm})^2} = 2.60 \text{ kOhm}$$

أي أن المعاوقة الحثية والمقاومة تهيمنان تماماً في حدود خطأ التقريب. وللمقارنة، فإن معاوقة هذه الدائرة في حالة الرنين تساوي

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(91.0 \text{ Ohm})^2 + 0} = 91.0 \text{ Ohm}$$

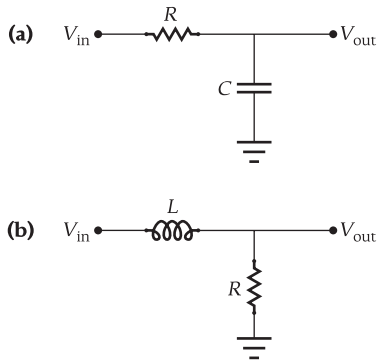
تعني هذه النتيجة أن الدائرة في المسألة بعيدة تماماً عن حالة الرنين، وهو ما يتسق مع القيم المختلفة تماماً التي حصلنا عليها للمفاعلتين السعوية والحثية. (تذكر أنه في حالة الرنين، تكون لكلتا المفاعلتين القيمة نفسها!)

افترض دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي مثل الموضحة في الشكل 10.13. وحدد ما إذا كانت كل عبارة من العبارات التالية صواباً أم خطأ.

- التيار المار في المقاوم يماثل التيار المار في الحث طوال الوقت.
- في الحالة المثالية، تنبذ الطاقة في المقاوم، لا في المكثف أو الحث.
- هبوط الجهد عبر المقاوم يماثل هبوط الجهد عبر الحث طوال الوقت.



الشكل 10.21 مرشح إمرار نطاقي نموذجي للهواتف التي توصل بدائرة منزلية فيها اتصال إنترنت DSL.



الشكل 10.22 مرشحان لإمرار الترددات المنخفضة: (a) يحتوي على مقاوم ومكثف RC؛ (b) يحتوي على مقاوم ومحث RL.

مرشحات التردد

لقد حللنا الدوائر التي تحتوي على قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن وذات تردد أحادي. ومع ذلك، تستخدم العديد من التطبيقات القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن التي تعكس تراكب العديد من الترددات. في بعض الحالات، يجب ترشيح بعض الترددات في هذا النوع من الدوائر. (يمكن استخدام دوائر توصيل الحث والمكثف والمقاوم على التوالي كمرشحات تردد). ومن الأمثلة على هذه الدائرة مرشحات DSL (الخط الرقمي المشترك) المخصصة لإجراء اتصالات بالإنترنت عبر خط هاتف منزلي. يوضح الشكل 10.21 مرشح DSL نموذجيًا.

يعمل اتصال الإنترنت DSL عند ترددات عالية ويتصل بخط الهاتف المنزلي العادي. يتسبب تردد التشغيل العالي لاتصال DSL في حدوث ضوضاء في الهواتف المنزلية. لذلك، عادةً ما يُركَّب **مرشح إمرار النطاق** في كل الهواتف داخل المنزل لترشيح الضوضاء عالية التردد الناتجة عن اتصال إنترنت DSL. ويمكن تصميم مرشحات التردد لتمرير الترددات المنخفضة ومنع الترددات العالية (مرشح إمرار ترددات منخفضة) أو لتمرير الترددات العالية ومنع الترددات المنخفضة (مرشح إمرار ترددات عالية). كما يمكن دمج مرشح إمرار ترددات منخفضة مع مرشح إمرار ترددات عالية للسماح بإمرار مجموعة من الترددات (مرشح إمرار النطاق) ومنع الترددات خارج هذا النطاق.

يوضح الشكل 10.22 مثالين لمرشح إمرار ترددات منخفضة، حيث V_{in} القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن مع العديد من الترددات. مرشح إمرار الترددات المنخفضة هو في الأساس مجزء جيد. حيث يمر جزء من الجهد الأصلي عبر الدائرة، بينما ينتقل جزء إلى الأرض. وبالنسبة إلى دائرة المقاوم والمكثف لمرشح إمرار الترددات المنخفضة الموضحة في الشكل 10.22a، فإن الترددات المنخفضة لها في الأساس دائرة مفتوحة، بينما تُرسل الترددات العالية إلى الأرض بصورة انتقائية. ومن ثمَّ لا تمر عبر المرشح سوى الإشارات ذات الترددات المنخفضة. هذا السلوك منطقي لأن التيار الذي ينتقل إلى الأرض يجب أن يمر عبر المكثف الذي يمنع أساسًا تدفق التيار للترددات المنخفضة لأنه يتم شحن لوحي المكثف، بينما لا يسمح التيار المتغير بسرعة بتراكم الشحنة على لوحي المكثف، ما يسمح بتدفق التيار. وبالنسبة إلى دائرة المقاوم والحث، الموضحة في الشكل 10.22b، تمر الترددات المنخفضة بسهولة عبر الحث بينما يتم منع الترددات العالية. يحدث هذا التأثير لأن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة ذاتيًا في الحث تعاكس التغيرات السريعة في التيار، ما يمنع بفاعلية تدفق التيار عبر الحث عند الترددات العالية، بينما ينتج التغير البطيء في التيار قوة دافعة كهربائية معاكسة أقل بكثير، ما يسمح بتدفق التيار.

لتحديد مدى أداء مرشح إمرار الترددات المنخفضة في الشكل 10.22a، نحدّد المقاوم والمكثف كوحدة ادخال في الدائرة. معاوقة الوحدة هي $Z_{in} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$. ومعاوقة وحدة الإخراج هي $Z_{out} = X_C$. نسبة القوة الدافعة الكهربائية الداخلة في المرشح والقوة الدافعة الكهربائية الخارجة من المرشح هي

$$(10.25) \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_{out}}{Z_{in}}$$

ومن ثمَّ يمكن كتابة القوة الدافعة الكهربائية على النحو التالي

$$(10.26) \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R}{X_C}\right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}$$

بالنسبة إلى دائرة المقاوم والحث لمرشح إمرار الترددات المنخفضة الموضحة في الشكل 10.22b، فإن $Z_{in} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ و $Z_{out} = R$. ما يسمح لنا بكتابة

$$(10.27) \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega^2 L^2 / R^2)}}$$

تردد **القطع**، ω_B ، بين الاستجابات للترددات العالية والمنخفضة هو التردد الذي عنده النسبة V_{out}/V_{in} تساوي $1/\sqrt{2} = 0.707$. عند هذا التردد لدائرة المقاوم والمكثف، لدينا المعادلة

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \omega_B^2 R^2 C^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

التي يمكننا حساب تردد القطع من خلالها:

$$(10.28) \quad \omega_B = \frac{1}{RC}$$

بالنسبة إلى دائرة المقاوم والمحث لمرشح إمرار الترددات المنخفضة، نحصل على تردد القطع من المعادلة 10.27:

$$(10.29) \quad \omega_B = \frac{R}{L}$$

يوضح الشكل 10.23 مثالين لمرشح إمرار الترددات العالية. مرشح إمرار الترددات العالية هو مجزء جهد أيضًا. وبالنسبة إلى دائرة المقاوم والمكثف لمرشح إمرار الترددات العالية الموضحة في الشكل 10.23a، لا يمكن للإشارات ذات الترددات المنخفضة أن تمر عبر المكثف، أما الإشارات ذات الترددات العالية فتتمر عبره بسهولة. هذا السلوك منطقي لأن الإشارة يجب أن تمر عبر المكثف الذي يمنع أساسًا تدفق التيار للترددات المنخفضة لأنه يتم شحن لوحي المكثف، بينما لا يسمح التيار المتغير بسرعة بتراكم الشحنة على لوحي المكثف، ما يسمح بتدفق التيار. في دائرة المقاوم والمحث الموضحة في الشكل 10.23b، فإن الإشارات ذات الترددات المنخفضة لها في الأساس دائرة مفتوحة متصلة بالأرض، بينما تُمنع الإشارات ذات الترددات العالية من الوصول إلى الأرض. ومن ثمَّ لا تمر عبر المرشح إلا الإشارات ذات الترددات العالية. يحدث هذا التأثير لأن القوة الدافعة الكهربائية المستحثة ذاتيًا في المحث تعاكس التغيرات السريعة في التيار، ما يمنع بفاعلية تدفق التيار عبر المحث عند الترددات العالية، بينما ينتج التغير البطيء في التيار قوة دافعة كهربائية معاكسة أقل بكثير، ما يسمح بتدفق التيار.

بالنسبة إلى دائرة المقاوم والمكثف لمرشح إمرار الترددات العالية في الشكل 10.23a، تكون معاوقة وحدة الإدخال $Z_{in} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ ، بينما تكون معاوقة وحدة الإخراج $Z_{out} = R$. ومن ثم تكون نسبة القوة الدافعة الكهربائية الداخلة إلى القوة الدافعة الكهربائية الخارجة كما يلي

$$(10.30) \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + X_C^2/R^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 R^2 C^2}}}$$

في دائرة المقاوم والمحث لمرشح إمرار الترددات العالية الموضحة في الشكل 10.23b، تكون نسبة القوة الدافعة الكهربائية الداخلة إلى القوة الدافعة الكهربائية الخارجة كما يلي

$$(10.31) \quad \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{R^2}{X_L^2} + 1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R^2}{\omega^2 L^2}}}$$

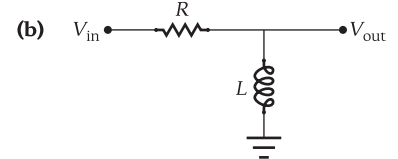
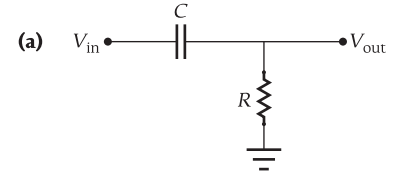
في مرشحات إمرار الترددات العالية هذه، كلما زاد التردد، اقتربت نسبة القوة الدافعة الكهربائية الداخلة إلى القوة الدافعة الكهربائية الخارجة من 1. بينما في حالة الترددات المنخفضة، تقل نسبة القوة الدافعة الكهربائية الخارجة إلى القوة الدافعة الكهربائية الداخلة لتصل إلى الصفر. وتتماثل ترددات القطع لمرشحات إمرار الترددات المنخفضة ومرشحات إمرار الترددات العالية: $\omega_B = 1/(RC)$ لدائرة المقاوم والمكثف و $\omega_B = R/L$ لدائرة المقاوم والمحث.

يوضح الشكل 10.24 مثالاً لمرشح إمرار النطاق. يتكون مرشح إمرار النطاق من مرشح إمرار ترددات عالية متصل على التوالي بمرشح إمرار ترددات منخفضة. ومن ثمَّ يتم منع كل من الترددات العالية والمنخفضة، ويُسمح لنطاق ضيق من الترددات بالمرور عبر المرشح.

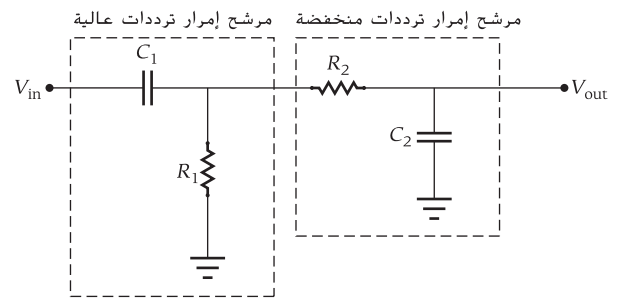
يوضح الشكل 10.25 الاستجابة الترددية لمرشح إمرار ترددات منخفضة ومرشح إمرار ترددات عالية حيث $R = 50.0 \Omega$ و $C = 20.0 \text{ mF}$. بالنسبة إلى تكوين المقاومة والسعة هذا، نجد أن تردد القطع يساوي

$$\omega_B = \frac{1}{RC} = \frac{1}{(50.0 \Omega)(20.0 \times 10^{-3} \text{ F})} = 1.00 \text{ rad/s}$$

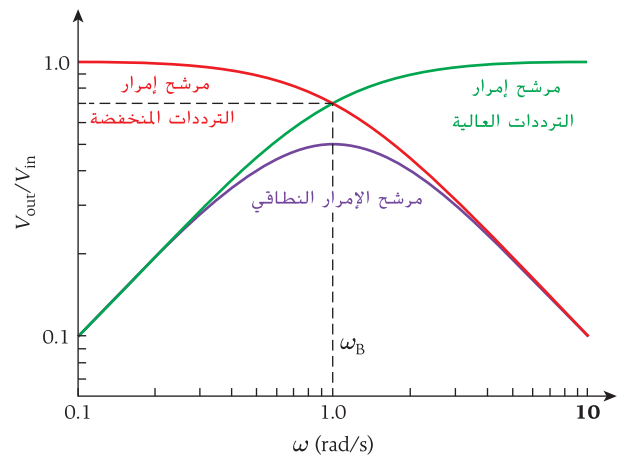
يوضح الشكل 10.25 أيضًا الاستجابة الترددية لمرشح إمرار نطاق حيث $R_1 = R_2 = 50.0 \Omega$ و $C_1 = C_2 = 20.0 \text{ mF}$.



الشكل 10.23 مرشحان لإمرار الترددات العالية: (a) يحتوي على مقاوم ومكثف؛ (b) يحتوي على مقاوم ومحث.



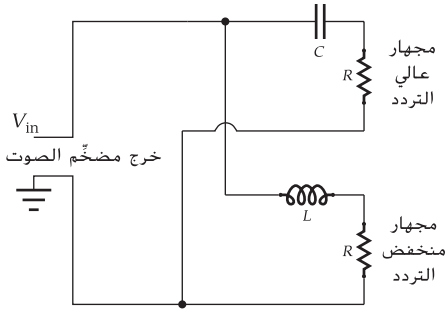
الشكل 10.24 مرشح إمرار نطاقي مكوّن من مرشح إمرار ترددات عالية متصل على التوالي بمرشح إمرار ترددات منخفضة.



الشكل 10.25 الاستجابة الترددية لمرشح إمرار ترددات منخفضة، ومرشح إمرار ترددات عالية، ومرشح إمرار نطاقي.

مراجعة المفاهيم 10.6

- الاستجابة الترددية لمرشح إمرار النطاق الممثل في الشكل 10.25 هي
- الاستجابة الترددية لمرشح إمرار الترددات المنخفضة والاستجابة الترددية لمرشح إمرار الترددات العالية.
- (a) مجموع (d) النسبة بين
- (b) حاصل ضرب (e) لا شيء مما سبق.
- (c) الفرق بينهما



الشكل 10.26 دائرة الرنين لمكبرات الصوت.

دائرة الرنين لمكبرات الصوت

مثال 10.3

من طرق تحسين أداء النظام الصوتي إرسال الترددات العالية إلى مكبر صوت صغير يسمى *المكبر عالي التردد*. وإرسال الترددات المنخفضة إلى مكبر صوت كبير يسمى *المكبر منخفض التردد*. يوضح الشكل 10.26 دائرة عبور بسيطة تمرر الترددات العليا بصورة انتقائية إلى مكبر عالي التردد، وتمرر الترددات المنخفضة إلى مكبر منخفض التردد. تتكون دائرة العبور من مرشح إمرار ترددات عالية يحتوي على مقاومة ومكثف ومرشح إمرار ترددات منخفضة يحتوي على مقاومة ومحث متصلين على التوازي بوحدة اخراج مضخم الصوت. يعمل مكبر الصوت كمقاومين كما هو موضح في الشكل 10.26. السعة والمقاومة لدائرة العبور هذه هما $C = 10.0 \mu\text{F}$ و $L = 10.0 \text{ mH}$. ولكل من مكبري الصوت مقاومة قوتها $R = 8.00 \Omega$.

المسألة

ما تردد الرنين للدائرة في المثال 10.3؟

الحل

يمكننا استخدام المعادلة 10.27 لإيجاد استجابة مرشح إمرار الترددات المنخفضة المحتوي على مقاوم ومحث. واستخدام المعادلة 10.30 لإيجاد استجابة مرشح إمرار الترددات العالية المحتوي على مقاوم ومكثف، ثم معادلة الاستجابتين:

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

إذًا، تكون استجابة مرشح إمرار الترددات المنخفضة واستجابة مرشح إمرار الترددات العالية متساويتين عندما (i)

$$X_L = X_C$$

يمكننا إعادة كتابة المعادلة (i) على النحو التالي

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

حيث دائرة العبور ω تردد العبور الزاوي. إذًا، تردد العبور الزاوي هو

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

نريد أن نحدد عبور التردد، وبما أن $f = \omega / 2\pi$ فإن

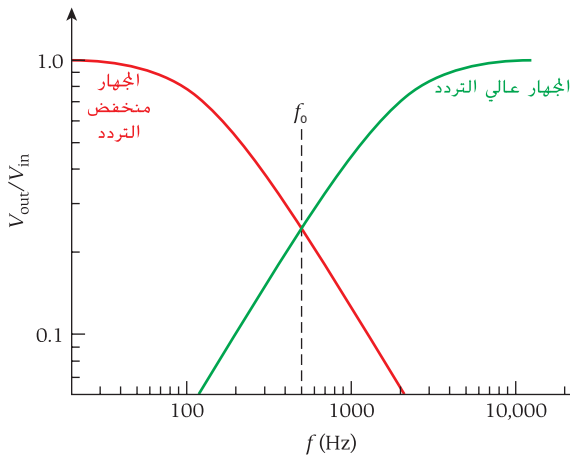
$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(10.0 \text{ mH})(10.0 \mu\text{F})}} = 503. \text{ Hz}$$

يوضح الشكل 10.27 استجابة دائرة الرنين كدالة تردد. تتقاطع استجابة إمرار الترددات المنخفضة مع استجابة إمرار الترددات العالية عند $f_0 = 503. \text{ Hz}$ دائرة الرنين f_0 . مع إرسال الترددات الأعلى بشكل أساسي إلى المكبر عالي التردد وإرسال الترددات المنخفضة بشكل أساسي إلى المكبر منخفض التردد.

لا تنتج دائرة الرنين البسيطة هذه أداءً صوتيًا مثاليًا مع الترددات واسعة النطاق وتصميمات مكبرات الصوت. كما تعمل دوائر الرنين الأكثر تطورًا التي تتميز بالأداء الأفضل بالترددات متوسطة النطاق.



الشكل 10.27 استجابة دائرة الرنين كدالة تردد.

10.6 الطاقة والقدرة في دوائر التيار المتردد

Energy and Power in AC Circuits

عندما تكون دائرة الحث والمكثف والمقاوم (RLC) قيد التشغيل، تُخزن بعض الطاقة الموجودة في الدائرة في المجال الكهربائي للمكثف، وتُخزن بعض الطاقة في المجال المغناطيسي للمحث، وتتبدد بعض الطاقة في صورة حرارة في المقاوم. وفي معظم التطبيقات، نهتم في الحالة المستقرة للدائرة، وفيها يحدث تلاشي التأثيرات الأولية (المؤقتة). (يمكن أن يقدم التحليل الرياضي الكامل أيضًا تفسيرًا للتأثيرات المؤقتة، التي تتلاشى أسبقًا بطريقة ماثلة لتلك التي توضحها المعادلة 10.6 لدائرة الحث والمكثف والمقاوم ذات المسار الواحد غير المزودة بمصدر للقوة الدافعة الكهربائية). لا يتغير مجموع الطاقة المخزنة في المكثف والحث في



الحالة الثابتة. كما رأينا في القسم 10.2. ولذلك، فإن الطاقة المنقولة من مصدر القوة الدافعة الكهربائية إلى الدائرة تنتقل إلى المقاوم.

معدل تبدد الطاقة في المقاوم هو القدرة، P . ونحصل عليها من خلال المعادلة

$$(10.32) \quad P = i^2 R = [I \sin(\omega t - \phi)]^2 R = I^2 R \sin^2(\omega t - \phi)$$

حيث نحصل على التيار المتردد، i ، من المعادلة 10.9. ويمكننا التعبير عن متوسط القدرة، $\langle P \rangle$ ، باستخدام حقيقة أن متوسط قيمة $\sin^2(\omega t - \phi)$ خلال الذبذبة الكاملة يساوي $\frac{1}{2}$:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I^2 R = \left(\frac{I}{\sqrt{2}} \right)^2 R$$

في حسابات القدرة والطاقة، يشيع استخدام جذر متوسط مربع التيار والذي يسمى **القيمة الفعالة للتيار**، I_{rms} . (بشكل عام، القيمة الفعالة، أو rms ، يعني الجذر التربيعي لمتوسط مربع الكمية المحددة). من المعادلة 10.32، لدينا $i^2 = [I \sin(\omega t - \phi)]^2$ ومتوسط i^2 يكون $I^2/2$. ومن ثم فإن $I_{\text{rms}} = I/\sqrt{2}$. يمكننا بعد ذلك كتابة متوسط القدرة كما يلي

$$(10.33) \quad \langle P \rangle = I_{\text{rms}}^2 R$$

بطريقة مماثلة، يمكننا تحديد قيم فعالة لكميات أخرى متغيرة مع الزمن، مثل الجهد:

$$(10.34) \quad V_{\text{rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

قيمتا التيار والجهد اللتان عادة ما تُستخدمان للتيارات المترددة وتُقاسان بأجهزة أميتر وفولتميتر التيار المتردد هما I_{rms} و V_{rms} . على سبيل المثال، توفر مقاييس الحائط المستخدمة في الولايات المتحدة جهداً مقداره $V_{\text{rms}} = 110 \text{ V}$ ، وهو ما يتوافق مع جهد أقصاه $156 \text{ V} \approx \sqrt{2}(110 \text{ V})$. يمكننا إعادة كتابة المعادلة 10.21 بدلالة قيم جذر متوسط المربع من خلال ضرب طرفي المعادلة في $1/\sqrt{2}$:

$$(10.35) \quad I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{V_{\text{rms}}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}$$

نُستخدم هذه المعادلة غالباً لوصف خصائص دوائر التيار المتردد. يمكننا تحديد متوسط القدرة المبذولة في دائرة التيار المتردد بطريقة مختلفة من خلال البدء بالمعادلة 10.33:

$$(10.36) \quad \langle P \rangle = I_{\text{rms}}^2 R = \frac{V_{\text{rms}}}{Z} I_{\text{rms}} R = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \frac{R}{Z}$$

من الشكل 10.16، نلاحظ أن جيب تمام ثابت الطور يساوي نسبة أقصى قيمة للجهد عبر المقاوم إلى أقصى قيمة للقوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن:

$$(10.37) \quad \cos \phi = \frac{V_R}{V_m} = \frac{IR}{IZ} = \frac{R}{Z}$$

ومن ثم يمكننا إعادة كتابة المعادلة 10.36 كما يلي:

$$(10.38) \quad \langle P \rangle = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \cos \phi$$

تعطي هذه المعادلة متوسط القدرة المبذولة في دائرة التيار المتردد، حيث يُسمى الحد $\cos \phi$ **عامل القدرة**. نلاحظ أنه عندما $\phi = 0$ ، تتبدد أقصى قدرة في الدائرة؛ أي أن أقصى قدرة تتبدد في دائرة التيار المتردد عندما يطابق تردد القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن تردد رنين الدائرة. يمكننا الجمع بين المعادلات 10.19 و 10.35 و 10.36 للحصول على معادلة لإيجاد متوسط القدرة كدالة للتردد الزاوي، ومعامل الحث، والمقاومة، وتردد الرنين:

$$\langle P \rangle = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \frac{R}{Z} = \frac{V_{\text{rms}}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} V_{\text{rms}} \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}$$



أو

$$\langle P \rangle = \frac{V_{\text{rms}}^2 R}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

بما أن $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ، يمكننا أن نكتب $C = 1/(\omega_0^2 L)$ ، وبهذا نتوصل إلى متوسط القدرة لدائرة توصيل الحث والمكثف والمقاوم على التوالي بدلالة التردد الزاوي:

$$(10.39) \quad \langle P \rangle = \frac{V_{\text{rms}}^2 R}{R^2 + \left(\omega L - \frac{L\omega_0^2}{\omega} \right)^2} = \frac{V_{\text{rms}}^2 R \omega^2}{R^2 \omega^2 + L^2 (\omega^2 - \omega_0^2)^2}$$

تُحدّد الجهود والتيارات الكهربائية والقدرة في دوائر التيار المتردد على أنها قيم فعالة. على سبيل المثال، جهد دائرة التيار المتردد في مقاييس الحائط هو $V_{\text{rms}} = 110 \text{ V}$ ، والقدرة التي يستخدمها مجفف الشعر هي $P_{\text{rms}} = 1000 \text{ W}$.

انخفاض الجهد عبر الحث

مسألة محلولة 10.1

دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي مزودة بمصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن تعطي بهذا $V_{\text{rms}} = 170.0 \text{ V}$ ، ومقاومة $R = 820.0 \Omega$ ، وحثاً $L = 30.0 \text{ mH}$ ، وسعة $C = 0.290 \text{ mF}$. وتعمل الدائرة عند تردد الرنين.

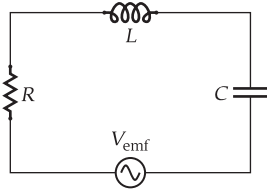
المسألة

ما القيمة الفعالة للجهد بين طرفي الحث؟

الحل

فكر عند تردد الرنين، تكون معاوقة الدائرة مساوية للمقاومة. ويمكننا حساب القيمة الفعالة للتيار في الدائرة. عندئذٍ يساوي انخفاض الجهد عبر الحث حاصل ضرب القيمة الفعالة للتيار في الدائرة في المفاعلة الحثية.

الرسم يوضّح الشكل 10.28 رسماً تخطيطياً لدائرة توصيل الحث والمكثف والمقاوم على التوالي.



الشكل 10.28 دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي.

ابحث عند تردد الرنين، تكون معاوقة الدائرة

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$$

عند تردد الرنين، نحصل على القيمة الفعالة للتيار، I_{rms} ، في الدائرة من خلال

$$V_{\text{rms}} = I_{\text{rms}} R$$

القيمة الفعالة لانخفاض الجهد عبر الحث، V_L ، عند تردد الرنين يساوي

$$V_L = I_{\text{rms}} X_L$$

حيث المفاعلة الحثية X_L تساوي

$$X_L = \omega L$$

ولذا التردد الزاوي الذي تعمل عنده الدائرة. وتردد الرنين الزاوي، ω_0 ، للدائرة يساوي

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

بسّط بالجمع بين كل هذه المعادلات، نحصل على انخفاض الجهد عبر الحث عند تردد الرنين:

$$V_L = \left(\frac{V_{\text{rms}}}{R} \right) (\omega_0 L) = \frac{L V_{\text{rms}}}{R} \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{V_{\text{rms}}}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية، نحصل على

$$V_L = \frac{170.0 \text{ V}}{820.0 \Omega} \sqrt{\frac{30.0 \times 10^{-3} \text{ H}}{0.290 \times 10^{-3} \text{ F}}} = 2.10861 \text{ V}$$

قَرِّب سنقرب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$V_L = 2.11 \text{ V}$$

تحقق ثانية القيمة الفعالة لانخفاض الجهد عبر المكثف يساوي

$$V_C = \left(\frac{V_{\text{rms}}}{R} \right) \left(\frac{1}{\omega_0 C} \right) = \frac{V_{\text{rms}}}{RC} \sqrt{LC} = \left(\frac{V_{\text{rms}}}{R} \right) \sqrt{\frac{L}{C}}$$

وهو نفسه القيمة الفعالة لانخفاض الجهد عبر المحث. عند تردد الرنين، يساوي انخفاض الجهد اللحظي عبر المحث سالب انخفاض الجهد عبر المكثف. لذا، يجب أن تكون القيمة الفعالة للجهد عبر المكثف تماثلاً للقيمة الفعالة للجهد عبر المحث. ومن ثَمَّ، تبدو النتيجة التي توصلنا إليها منطقية.

القدرة المبددة في دائرة المحث والمكثف والمقاوم (RLC)

مسألة محلولة 10.2

دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي مزودة بمصدر قوة دافعة كهربائية يعطي بهذا $V_{\text{rms}} = 120.0 \text{ V}$ عند تردد $f = 50.0 \text{ Hz}$. بالإضافة إلى محث، $L = 0.500 \text{ H}$ ، ومكثف، $C = 3.30 \mu\text{F}$ ، ومقاوم، $R = 276 \Omega$.

المسألة

ما متوسط القدرة المتبددة في الدائرة؟

الحل

فكر متوسط القدرة المتبددة في الدائرة هو القيمة الفعالة للتيار مضروباً في القيمة الفعالة للجهد. لكنه يعتمد على التردد الزاوي لمصدر القوة الدافعة الكهربائية. يمكن إيجاد التيار في الدائرة باستخدام المعاوقة.

ارسم يوضح الشكل 10.28 رسماً تخطيطياً لدائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي.

ابحث التردد الزاوي، ω ، لمصدر القوة الدافعة الكهربائية يساوي

$$\omega = 2\pi f$$

معاوقة الدائرة، Z ، تساوي

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

حيث نحصل على المفاعلة الحثية من خلال

$$X_L = \omega L$$

ونحصل على المفاعلة السعوية من خلال

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

يمكننا إيجاد القيمة الفعالة للتيار، I_{rms} ، في الدائرة باستخدام المعادلة

$$V_{\text{rms}} = I_{\text{rms}} Z$$

نحصل على متوسط القدرة المتبددة في الدائرة، $\langle P \rangle$ ، من خلال

$$\langle P \rangle = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \cos \phi$$

حيث ϕ ثابت الطور بين الجهد والتيار في الدائرة:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right)$$

بسّط يمكننا الجمع بين كل هذه المعادلات للحصول على معادلة لإيجاد متوسط القدرة المبددة في الدائرة:

$$\langle P \rangle = \frac{V_{\text{rms}}^2}{Z} \cos \phi = \frac{V_{\text{rms}}^2}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \cos \phi$$

احسب أولاً، نحسب المفاعلة الحثية:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 2\pi (50.0 \text{ Hz})(0.500 \text{ H}) = 157.1 \Omega$$

بعد ذلك، نحسب المفاعلة السعوية:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi (50.0 \text{ Hz})(3.30 \times 10^{-6} \text{ F})} = 964.6 \Omega$$

إذاً ثابت الطور يساوي

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{157.1 \Omega - 964.6 \Omega}{276 \Omega} \right) = -1.241 \text{ rad} = -71.13^\circ$$

نحسب الآن متوسط القدرة المبذولة في الدائرة:

$$\langle P \rangle = \frac{(120.0 \text{ V})^2}{\sqrt{(276 \Omega)^2 + (157.1 \Omega - 964.6 \Omega)^2}} \cos(-1.241 \text{ rad}) = 5.46477 \text{ W}$$

قرب سنقرب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$\langle P \rangle = 5.46 \text{ W}$$

تَحَقُّقٌ ثَانِيَةٌ لنتحقق ثانية من النتيجة التي توصلنا إليها. يمكننا حساب القدرة التي ستبذل في الدائرة إذا كانت الدائرة تعمل عند تردد الرنين. عند تردد الرنين، تبذل أقصى قدرة في الدائرة، وتكون مقاومة الدائرة مساوية لمقاومة المقاوم. لذلك، فإن الحد الأقصى لمتوسط القدرة يساوي

$$\langle P \rangle_{\max} = \frac{V_{\text{rms}}^2}{R} = \frac{(120.0 \text{ V})^2}{276 \Omega} = 52.2 \text{ W}$$

النتيجة التي توصلنا إليها للقدرة المبذولة عند $f = 50.0 \text{ Hz}$ أقل من الحد الأقصى لمتوسط القدرة. لذا تبدو إجابتنا منطقية.

عامل الجودة

يُعرَّف عامل الجودة، Q ، لدائرة توصيل الحث والمكثف والمقاوم على التوالي كما يلي

$$(10.40) \quad Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

عامل الجودة هو نسبة الطاقة الكلية المخزنة في النظام مقسومة على الطاقة المتبددة لكل زمن دوري. وبالنسبة إلى دائرة توصيل الحث والمكثف والمقاوم على التوالي، فإن عامل الجودة يميّز انتقائية الدائرة. فكلما ارتفعت قيمة Q ، زادت انتقائية الدائرة، أي أنه يمكن عزل تردد معين بشكل أكثر دقة (كما هو الحال في مستقبل راديو AM، الذي ستم مناقشته فيما يلي). وكلما قلت قيمة Q ، قلت انتقائية الدائرة.

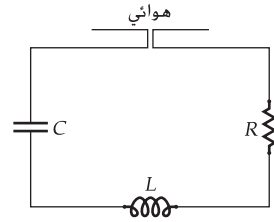
مستقبل راديو AM

لنلق نظرة على مثال نموذجي لدائرة الحث والمكثف والمقاوم على التوالي الانتقائية، وهو مستقبل راديو AM. يمكن صناعة مستقبل راديو AM باستخدام دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي يتم فيها تزويد القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن بهوائي يلتقط إرسالاً من محطة راديو بعيدة بُث عند تردد معين ويحول هذا الإرسال إلى جهد. كما هو موضح في الشكل 10.29. الشكل 10.30 عبارة عن تمثيل لمتوسط القدرة كدالة لتردد الإشارة التي يستقبلها الهوائي للدائرة المبينة في الشكل 10.29. على افتراض أن $V_{\text{rms}} = 3.500 \text{ mV}$ ، و $C = 6.693 \text{ nF}$ ، و $L = 5.000 \mu\text{H}$ ، و $R = 0.09111 \Omega$. تردد الرنين الزاوي للدائرة يساوي

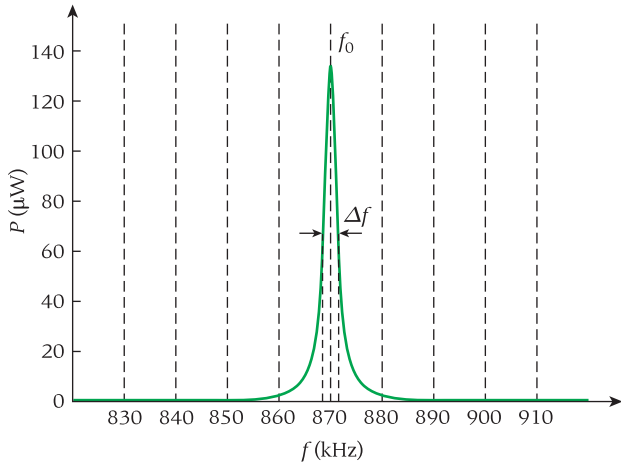
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{(5.000 \times 10^{-6} \text{ H})(6.693 \times 10^{-9} \text{ F})}} = 5.466 \times 10^6 \text{ rad/s}$$

وهو ما يطابق تردد الرنين

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{5.466 \times 10^6 \text{ rad/s}}{2\pi} = 870.0 \text{ kHz.}$$



الشكل 10.29 دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي استُبدل فيها مصدر القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن بهوائي. يمكن أن تعمل هذه الدائرة كمستقبل راديو AM.



الشكل 10.30 استجابة القدرة لدائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي تعمل كمستقبل راديو AM. يشير الرمز Δf إلى العرض الكامل عند نصف الحد الأقصى، أو إلى الفرق بين الترددات عندما تصل القدرة إلى نصف قيمتها العظمى، عند التردد f_0 .

مراجعة المفاهيم 10.7

توصّل شبكات الإنترنت اللاسلكية (WiFi) في معظم الأماكن لتوفير الاتصال بالإنترنت. وأكثر معايير شبكات الإنترنت اللاسلكية شيوعاً هو 802.11 g الذي يدعم معدلات اتصال تصل إلى 54 ميجابت في الثانية. في الولايات المتحدة وكندا، تُستخدم الشبكات اللاسلكية التي تتبع هذا المعيار ترددًا يصل إلى حوالي 2.4 GHz. في 14 قناة مختلفة في النطاق بين 2.401 GHz و 2.495 GHz، إذا كان العرض الكامل عند نصف الحد الأقصى لكل قناة هو 22 MHz، فما قيمة عامل الجودة لهذه الشبكات؟

109 (d)	0.1 (a)
100 (e)	9.9 (b)
	33 (c)

عامل الجودة لهذه الدائرة يساوي

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{(5.466 \times 10^6 \text{ rad/s})(5.000 \times 10^{-6} \text{ H})}{0.09111 \Omega} = 300.0$$

ثمة طريقة لتحديد عامل الجودة التقريبي لدائرة توصيل الحث والمكثف والمقاوم على التوالي تُستخدم المعادلة التالية

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta \omega} = \frac{f_0}{\Delta f}$$

حيث $\Delta \omega$ و Δf هما العرضان الكاملان عند نصف الحد الأقصى للتردد الزاوي والتردد، على التوالي، على منحنى استجابة القدرة. كلما زادت قيمة Q ، قلت استجابة القدرة للتردد. وفي الشكل 10.30، نجد أن $\Delta f = 2.9 \text{ kHz}$ ، وهو ما يعطينا عامل الجودة التالي

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{870.0 \text{ kHz}}{2.9 \text{ kHz}} = 300.0$$

هذه هي النتيجة نفسها التي حصلنا عليها باستخدام المعادلة التي تعرّف عامل الجودة في المعادلة 10.40. لاحظ أن هاتين الصيغتين لعامل الجودة لهما النتيجة نفسها فقط مع قيمة Q المرتفعة!

تمثل الصيغة البديلة لعامل الجودة لدائرة توصيل الحث والمكثف والمقاوم على التوالي التعبير لجودة

مولد الذبذبات الميكانيكية ضعيفة المضائلة، $Q \approx \frac{\omega_0}{2\omega_\gamma}$ حيث ω_0 هو التردد الرنين الزاوي، و ω_γ هو التردد الزاوي المتخامد.

في الشكل 10.30، يُشار إلى ترددات القنوات المتجاورة في نطاق راديو AM بالخطوط الرأسية المتقطعة التي تفصل بين كل منها 10 kHz. تسمح استجابة دائرة توصيل الحث والمكثف والمقاوم على التوالي لمستقبل AM بضبط موالفة محطة واحدة واستبعاد القنوات المجاورة.

مسألة محلولة 10.3

معامل الحث المجهول في دائرة الحث والمقاوم (RL)

افترض دائرة توصيل حث ومقاوم على التوالي مزوّدة بمصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن. في هذه الدائرة، $V_{\text{rms}} = 33.0 \text{ V}$ بتردد $f = 7.10 \text{ kHz}$ ، و $R = 83.0 \Omega$ ، ويتدفق تيار $I_{\text{rms}} = 0.158 \text{ A}$ في الدائرة.

المسألة

ما مقدار الحث، L ؟

الحل

فكر الجهد والتيار المحددان هما ضمنياً القيم الفعلية. ويمكننا ربط الجهد بالتيار من خلال معاوقة الدائرة. تعتمد معاوقة هذه الدائرة على المقاومة والحث، إلى جانب تردد مصدر القوة الدافعة الكهربائية.

ارسم يوضّح الشكل 10.31 رسماً تخطيطياً للدائرة.

ابحث يمكننا ربط القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن، V_m ، بالحث Z في الدائرة؛

$$(i) \quad V_m = IZ$$

نحصل على المعاوقة من خلال

$$(ii) \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

حيث R المقاومة، و X_L المفاعلة الحثية، و X_C المفاعلة السّعووية، التي تساوي صفراً. ونحصل على التردد الزاوي، ω ، للدائرة من خلال

$$\omega = 2\pi f$$

حيث f التردد. ويمكننا أن نعبر عن المفاعلة الحثية بالصيغة

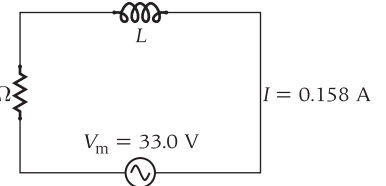
$$(iii) \quad X_L = \omega L$$

بسّط يمكننا الجمع بين المعادلات (i) و(ii) و(iii) للحصول على

$$(iv) \quad Z^2 = R^2 + X_L^2 = \left(\frac{V_m}{I}\right)^2 = R^2 + (\omega L)^2$$

بإعادة ترتيب المعادلة (iv)، نحصل على

$$\omega L = \sqrt{\frac{V_m^2}{I^2} - R^2}$$



الشكل 10.31 دائرة توصيل حث ومقاوم على التوالي.

مراجعة المفاهيم 10.8

في دائرة توصيل الحث والمقاوم على التوالي الموضحة في المسألة المحلولة 10.3. ما مقدار فرق الطور بين القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن والتيار في الدائرة؟

75.0° (d)	30.0° (a)
90.0° (e)	45.0° (b)
	66.6° (c)

وأخيرًا، نوجد مقدار الحث المجهول:

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{V_m^2}{I^2} - R^2}$$

احسب بالتعويض باستخدام القيم العددية، نحصل على

$$L = \frac{1}{2\pi(7.10 \times 10^3 \text{ s}^{-1})} \sqrt{\frac{(33.0 \text{ V})^2}{(0.158 \text{ A})^2} - (83.0 \Omega)^2} = 0.0042963 \text{ H}$$

قرب سنقرب النتيجة التي توصلنا إليها إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$L = 4.30 \times 10^{-3} \text{ H} = 4.30 \text{ mH}$$

تحقق ثانية لنتحقق ثانية من النتيجة التي توصلنا إليها لمقدار معامل الحث، نحسب المفاعلة الحثية أولاً:

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(7.10 \times 10^3 \text{ s}^{-1})(4.30 \times 10^{-3} \text{ H}) = 192 \Omega$$

عندئذ، معاوقة الدائرة تساوي

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{(83.0 \Omega)^2 + (192 \Omega)^2} = 209 \Omega$$

نستخدم قيمة Z هذه لحساب قيمة V_m :

$$V_m = IZ = (0.158 \text{ A})(209 \Omega) = 33.0 \text{ V}$$

وهو ما يتوافق مع القيمة المحددة في المسألة. ومن ثم فإن النتيجة التي توصلنا إليها مناسبة.

سؤال الاختبار الذاتي 10.5

قد ترى أن شركات الطاقة تحتاج فقط إلى تقليل المقاومة في خطوط الإرسال التي تستخدمها لتجنب حدوث خسائر كبيرة في الطاقة. يعادل سمك الأسلاك النموذجية المستخدمة كخطوط لإرسال الطاقة سمك الإصبع. إذا افترضنا ثبات كل المتغيرات الأخرى (كمادة الأسلاك المستخدمة وطولها)، فما سمك الأسلاك اللازم لتقليل المقاومة بمعامل 100؟

Transformers

10.7 المحولات



(a)



(b)

يناقش هذا القيم الفعالة للتيار والجهد، بدلاً من القيم القصوى أو اللحظية. دائماً ما تكون النتيجة التي نحصل عليها للقدرة هي متوسط القدرة عندما نستخدم القيم الفعالة. وهذا هو المبدأ الذي عادةً ما يتبعه العلماء والمهندسون والكهربائيون الذين يتعاملون مع دوائر التيار المتردد. في دائرة التيار المتردد المحتوية على مقاوم فقط، يكون ثابت الطور صفراً. لذا يمكننا التعبير عن القدرة كما يلي

$$(10.41) \quad P = IV$$

يستلزم توصيل طاقة معينة إلى الدائرة اختيار التيار العالي أو الجهد العالي. على سبيل المثال، لتوفير قدرة كافية لتشغيل كمبيوتر أو مكنسة كهربائية، قد يُشكّل استخدام الجهد العالي خطراً. ويكون تصميم المولدات الكهربائية معقداً بسبب استخدام الجهود الكهربائية العالية. لذلك، في هذه الأجهزة، يكون استخدام الجهود المنخفضة والتيارات العالية ملائماً.

لكن نقل القدرة الكهربائية يتطلب العكس. نحصل على القدرة المتبددة في خط النقل من خلال $P = I^2 R$. لذا، فإن القدرة المفقودة في خط، مثل تلك الموجودة في الشكل 10.32a، تتناسب طردياً مع مربع التيار المار في الخط. كبمثال، افترض أن محطة طاقة تنتج طاقة بقدرة 500 MW. إذا نُقلت القدرة بجهد 350 kV، فسيكون التيار المار في خطوط الطاقة

$$I = \frac{P}{V} = \frac{500 \text{ MW}}{350 \text{ kV}} = \frac{5.00 \times 10^8 \text{ W}}{3.50 \times 10^5 \text{ V}} = 1.43 \text{ kA}$$

إذا كانت المقاومة الإجمالية لاسلاك نقل الطاقة 50Ω ، فإن القدرة المفقودة في خطوط النقل ستساوي

$$P = I^2 R = (1.43 \text{ kA})^2 (50.0 \Omega) = 102 \text{ MW}$$

أو حوالي 20% من القدرة المولدة. ستُظهر عملية حسابية مماثلة أن نقل القدرة بجهد 200 kV بدلاً من 350 kV سيزيد من فقد القدرة بمعامل 3.1. لذا فإن ما يقرب من 60% من القدرة المولدة سيفقد أثناء النقل. ولهذا السبب، يتم نقل القدرة الكهربائية بأعلى جهد ممكن دائماً.

تسمح القدرة على تغيير الجهد بتوليد القدرة الكهربائية واستخدامها عند جهود منخفضة وآمنة، لكنها تنتقل بأعلى جهد فعلي. ويتم تحويل التيارات المترددة والجهود من القيم العالية إلى القيم المنخفضة باستخدام جهاز تحويل يُسمى **محولات**. يُسمى الحول الذي يغيّر الجهود من القيم الأقل إلى القيم الأعلى **محولاتاً رافعة**؛ بينما يسمى الحول الذي يغيّر الجهود من القيم الأعلى إلى القيم الأقل **محولاتاً خافضة**. والمحولات هي المكونات الرئيسية، على سبيل المثال،

الشكل 10.32 (a) خطوط طاقة عالية الجهد؛ (b) محولات خطوط الطاقة في المناطق السكنية.

لشاحن الهاتف الخلوي (الشكل 10.33) ومصدر الطاقة لمشغل MP3، والكمبيوتر المحمول، وكل الأجهزة الإلكترونية الاستهلاكية الأخرى تقريبًا. حيث تتطلب معظم هذه الأجهزة جهودًا بقيمة 12 V أو أقل، ولكن الشبكة في الولايات المتحدة توفر 110 V في المقاييس الكهربائية، ما يتطلب استخدام المحولات.

يتكون المحوّل من ملفين ملفوفين حول قلب حديدي (شكل 10.34). يتصل الملف الابتدائي، ذو لفات N_p ، بمصدر للقوة الدافعة الكهربائية الموضحة كما يلي

$$V_{emf} = V_{max} \sin \omega t$$

سنفترض أن الملف الابتدائي يعمل كمحث. في الدائرة الابتدائية، يكون التيار والجهد مختلفي الطور بفارق طور مقداره $(\pi/2 \text{ rad})$ 90° . لذا فإن عامل القدرة، $\cos \phi$ ، يساوي صفرًا. ومن ثمّ، لن يوصل مصدر القوة الدافعة الكهربائية أي قدرة إلى المحوّل إذا كان الملف الابتدائي فقط هو الموصل. بمعنى آخر، إذا لم يكن الملف الثانوي متصلًا بدائرة مغلقة، فلن يسحب المحوّل أي قدرة. على سبيل المثال، لن يسحب شاحن هاتفك الخلوي أي قدرة إذا كان موصلًا بمقبس الحائط من دون توصيل الطرف الآخر بالهاتف الخلوي. (هذه العبارة ليست صحيحة تمامًا؛ فثمة مقاومة محدودة في أسلاك الملف الابتدائي، وهذا الوصف يهملها).

يتكون الملف الثانوي للمحوّل من عدد لفات N_s . تستحث القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن في الملف الابتدائي مجالًا مغناطيسيًا متغيرًا مع الزمن في القلب الحديدي. ويمر هذا القلب عبر الملف الثانوي. لذا، يُستحث جهد متغير مع الزمن في الملف الثانوي، كما هو موضح في قانون فاراداي للحث:

$$V_{emf} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

حيث N عدد اللفات و Φ_B التدفق المغناطيسي. بسبب القلب الحديدي، فإن كلا الملفين الابتدائي والثانوي يتأثر بالتدفق المغناطيسي المتغير نفسه. لذا فإن

$$V_s = -N_s \frac{d\Phi_B}{dt}$$

9

$$V_p = -N_p \frac{d\Phi_B}{dt}$$

حيث V_s و V_p الجهودان عبر الملفين الثانوي والابتدائي. بقسمة إحدى هاتين المعادلتين على الأخرى وإعادة الترتيب، نحصل على

$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s}$$

أو

$$V_s = V_p \frac{N_s}{N_p} \quad (10.42)$$

يغيّر المحوّل جهدَ الدائرة الابتدائية إلى جهد ثانوي، ونحصل عليه من نسبة عدد اللفات في الملف الثانوي مقسومًا على عدد اللفات في الملف الابتدائي.

إذا تم توصيل مقاوم R ، عبر اللفات الثانوية، فسيبدأ تيار، I_s ، في التدفق عبر الملف الثانوي. وعندئذٍ ستكون القدرة في الدائرة الثانوية $P_s = I_s V_s$. ويستحث هذا التيار مجالًا مغناطيسيًا متغيرًا مع الزمن، فيستحث المجال جهدًا كهربيًا في الملف الابتدائي، بحيث ينتج مصدر القوة الدافعة الكهربائية تيارًا كافيًا، I_p ، للحفاظ على الجهد الأصلي. يكون هذا التيار، I_p ، متفقًا في الطور مع الجهد بسبب المقاوم، لذا يمكن نقل القدرة إلى المحوّل. ويستلزم حفظ الطاقة أن القدرة الموصلة إلى الملف الابتدائي تُنقل إلى الملف الثانوي، لذا يمكننا كتابة الصيغة التالية

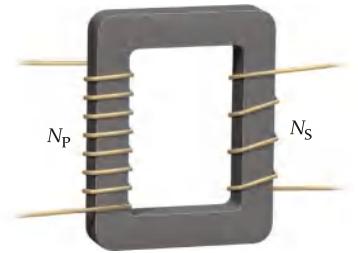
$$P_p = I_p V_p = P_s = I_s V_s$$

باستخدام المعادلة 10.42، يمكننا التعبير عن التيار في الدائرة الثانوية كما يلي

$$I_s = I_p \frac{V_p}{V_s} = I_p \frac{N_p}{N_s} \quad (10.43)$$



الشكل 10.33 المحوّل (الأصفر) ذو القلب (الأصفر) هو المكوّن الرئيس لشاحن الهاتف الخلوي. (يحتوي الشاحن أيضًا على مقوّم، كما موضح في القسم 10.8).



الشكل 10.34 محوّل مكوّن من عدد N_p من لفات الملف الابتدائي وعدد N_s من لفات الملف الثانوي.





التيار في الدائرة الثانوية يساوي التيار في الدائرة الابتدائية مضروباً في نسبة عدد اللفات الابتدائية مقسوماً على عدد اللفات الثانوية.

عندما تبدأ الدائرة الثانوية في سحب التيار، يجب أن يكون التيار موصلاً في الدائرة الابتدائية. بما أن $V_S = I_S R$ في الدائرة الثانوية، فيمكننا استخدام المعادلتين 10.42 و 10.43 لكتابة

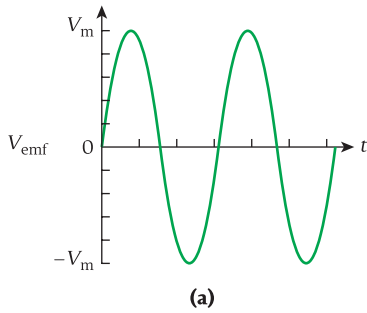
$$(10.44) \quad I_P = \frac{N_S}{N_P} I_S = \frac{N_S}{N_P} \frac{V_S}{R} = \frac{N_S}{N_P} \left(V_P \frac{N_S}{N_P} \right) \frac{1}{R} = \left(\frac{N_S}{N_P} \right)^2 \frac{V_P}{R}$$

يمكن التعبير عن المقاومة الفعالة للدائرة الابتدائية بدلالة $V_P = I_P R_P$. بحيث تكون المقاومة الفعالة

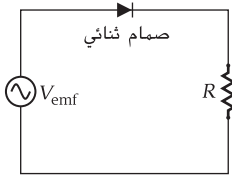
$$(10.45) \quad R_P = \frac{V_P}{I_P} = V_P \left(\frac{N_P}{N_S} \right)^2 \frac{R}{V_P} = \left(\frac{N_P}{N_S} \right)^2 R$$

لاحظ أننا افترضنا أنه لا يوجد أي فقد في المحول. وأن الملف الابتدائي هو مجرد محث، وأنه لا يوجد أي فقد في التدفق المغناطيسي بين الملفين الابتدائي والثانوي. وأن الدائرة الثانوية محتوية على المقاوم الوحيد. أما المحولات الحقيقية فيحدث فيها بعض الفقد. ويرجع جزء من هذا الفقد إلى أن المجالات المغناطيسية المتغيرة في الملفات تستحث تيارات دوامية في القلب الحديدي للمحول. وللتغلب على ذلك، تُصنع قلوب المحولات في شكل طبقات فلزية رقيقة لمنع تكوّن التيارات الدوامية. فالمحولات الحديثة تحوّل الجهود مع حدوث فقد ضئيل جداً.

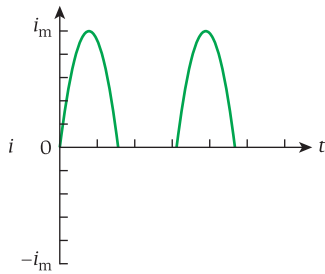
من الاستخدامات الأخرى للمحولات **مطابقة المعاوقة**. إن نقل القدرة، بين مصدر قوة دافعة كهربائية وجهاز يعمل بالطاقة، يصل إلى أقصاه عندما يكون لكل من المصدر والجهاز المعاوقة نفسها. وفي الغالب، لا يكون لمصدر القوة الدافعة الكهربائية والجهاز المُعدّل له المعاوقة نفسها. من الأمثلة الشائعة لذلك مضخم الصوت ومكبرات الصوت الخاصة به. فعادةً ما يكون لمضخم الصوت مقاومة عالية، بينما يكون لمكبرات الصوت مقاومة منخفضة. ويمكن للمحول الموضوع بين مضخم الصوت ومكبرات الصوت الخاصة به أن يساعد على مطابقة معاوقة الأجهزة. ما يؤدي إلى نقل الطاقة بشكل أكثر كفاءة.



(a)



(b)



(c)

الشكل 10.35 دائرة محتوية على (مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن، ومقاوم، وثنائي) تشكّل مقوّمًا نصف موجي؛ (a) القوة الدافعة الكهربائية كدالة زمن؛ (b) الرسم التخطيطي للدائرة؛ (c) التيار المتدفق عبر الدائرة كدالة زمن.



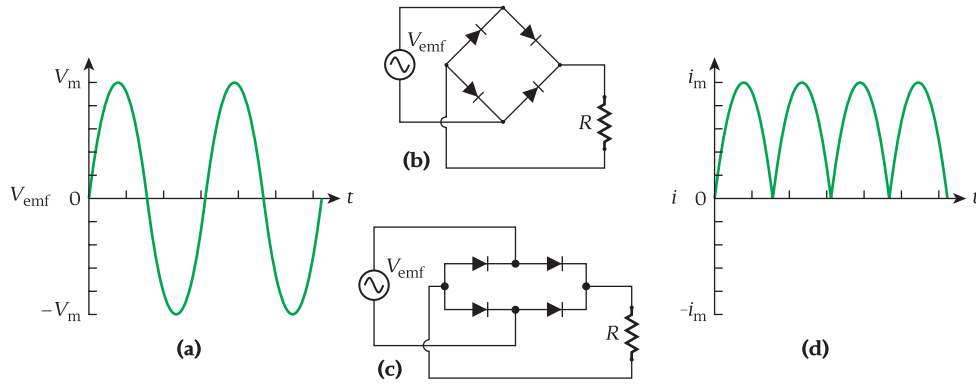
Rectifiers

10.8 المقومات

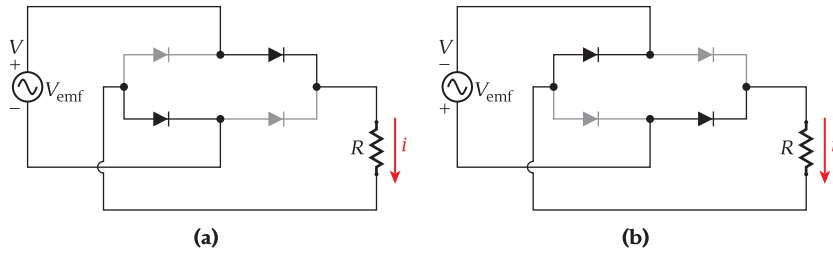
تتطلب العديد من الأجهزة الإلكترونية التيار المستمر بدلاً من التيار المتردد. لكن العديد من المصادر الشائعة للطاقة الكهربائية توفر تيارًا مترددًا. لذا، يجب تحويل هذا التيار إلى تيار مستمر لتشغيل المعدات الإلكترونية. **المقوّم** جهاز يقوم بتحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر. وتستخدم معظم المقومات مكونًا إلكترونيًا يسمى الثنائي (الدايود). يُصمّم الثنائي للسماح للتيار بالتدفق في اتجاه واحد، لا في الاتجاه الآخر. ويُرمز للثنائي بالرمز \rightarrow ، ويشير اتجاه رأس السهم إلى الاتجاه الذي سيُمرّر فيه الثنائي التيار.

لنبدأ بدائرة بسيطة تحتوي على مصدر للقوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن، ومقاوم، وثنائي، كما هو موضح في الشكل 10.35b. يكون الجهد الذي يعطيه مصدر القوة الدافعة الكهربائية موجبًا وسالبًا بالتناوب، كما هو موضح في الشكل 10.35a. لاحظ أن كلا طرفي مصدر القوة الدافعة الكهربائية متصلان في اللحظة نفسها بحيث إنه عندما يُنتج أحد الطرفين جهدًا موجبًا، يُنتج الطرف الآخر جهدًا سالبًا. تُنتج الدائرة في الشكل 10.35b التيار المار في المقاوم الذي يتدفق بالفعل في اتجاه واحد فقط. لكن تمنع الدائرة نصف التيار، كما هو موضح في الشكل 10.35c. لذا، يُسمى هذا النوع من الدوائر **مقوّمًا نصف موجي**.

للسماح بتدفق التيار كله في اتجاه واحد، يُستخدم نوع الدائرة الموضح في الشكل 10.36. مرة أخرى، يتناوب الجهد الكهربائي بين الموجب والسالب، كما هو موضح في الشكل 10.36a. يوضح الشكل 10.36b والشكل 10.36c رسمين تخطيطيين متكافئين للدائرة. يتدفق كل التيار المار في المقاوم في اتجاه واحد، كما هو موضح في الشكل 10.36d. ويُسمى هذا النوع من الدوائر **مقوّم الموجة الكاملة**. لتوضيح كيفية عمل مقوم الموجة الكاملة، يوضح الشكل 10.37 منظرين لحظيين للدائرة مع الجهد الموجب والجهد السالب. ففي الشكل 10.37a، يكون الجهد من مصدر القوة الدافعة الكهربائية موجبًا.



الشكل 10.36 دائرة محتوية على (مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن، ومقاوم، وأربعة صمامات ثنائية) تشكّل مقوّم موجة كاملة: (a) القوة الدافعة الكهربائية كدالة زمن؛ (b) الرسم التخطيطي للدائرة؛ (c) طريقة أخرى للرسم التخطيطي للدائرة؛ (d) التيار المتدفق عبر الدائرة كدالة زمن.



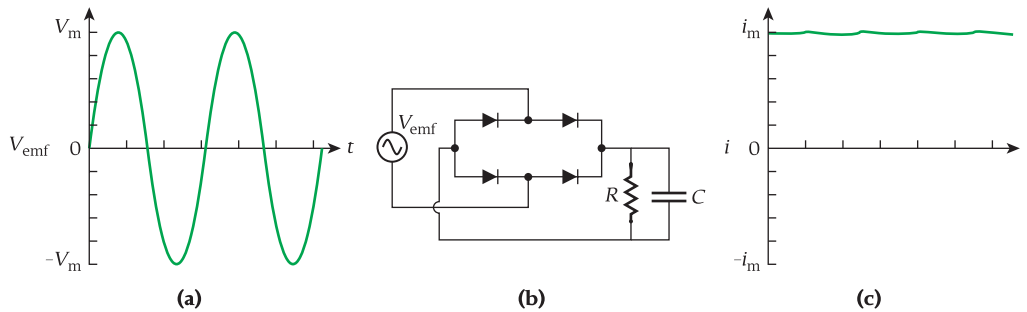
الشكل 10.37 مقوّم موجة كاملة مزود بصمامات ثنائية لا توصل التيار في اللحظة المشار إليها باللون الرمادي. يتدفق التيار المار في المقاوم في الاتجاه نفسه دائماً. (a) جهد كهربائي موجب. (b) جهد كهربائي سالب.

حيث يقوم الثنائيان المميزان باللون الأسود بتمرير التيار، بينما لا يمرر الثنائيان المميزان باللون الرمادي أي تيار. ثم يتم عكس الجهد كما في الشكل 10.37b، ويتدفق التيار عبر زوج الثنائيات الأخرى؛ ويبذل التيار في المقاوم متدفقاً في الاتجاه نفسه.

على الرغم من أن مقوّم الموجة الكاملة يقوم بالفعل بتحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر، فإن التيار المستمر الناتج يتغير بمرور الزمن. يمكن التغلب عليه عن طريق إضافة مكثف إلى دائرة الجهد المقوّم، لتكوين دائرة مقاوم ومكثف (RC) ذات ثابت زمني يتحدد باختيار R و C . كما هو موضح في الشكل 10.38. يوضح الشكل 10.38a القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن، ويوضح الشكل 10.38b الرسم التخطيطي للدائرة. يتم ترشيح التيار المباشر عن طريق المكثف المضاف. يوضح الشكل 10.38c التيار الناتج كدالة للزمن. ويبذل التيار متغيراً مع الزمن لكن أقل بكثير من التيار المتدفق الخارج من مقوّم الموجة الكاملة من دون مكثف.

سؤال الاختبار الذاتي 10.6

يُنتج مولّد التيار المتردد النموذجي المستخدم في السيارات تياراً متردداً ثلاثي الأطوار. ويُزاح كل طور عن الطور الذي يليه بمقدار 120° . ارسم مخطط الدائرة لمقوّم الموجة الكاملة الخاص بهذا المولّد، وفقاً لمخطط الدائرة الموضح في الشكل 10.36c. مع استخدام ستة صمامات ثنائية بدلاً من أربعة.



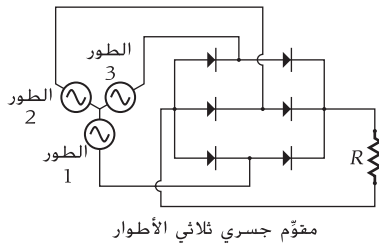
الشكل 10.38 دائرة محتوية على (مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن، ومقاوم، ومكثف، وأربعة صمامات ثنائية) تشكّل مقوّم موجة كاملة مرشحة: (a) القوة الدافعة الكهربائية كدالة زمن؛ (b) الرسم التخطيطي للدائرة؛ (c) التيار المتدفق عبر الدائرة كدالة زمن.

ما تعلمناه | دليل المذاكرة للاختبار

- نحصل على الطاقة المخزنة في المجال الكهربائي لمكثف سعته C وشحنته q من خلال المعادلة $U_E = \frac{1}{2}(q^2/C)$ ؛ ونحصل على الطاقة المخزنة في المجال المغناطيسي للمحث الذي معامل حثه L ويحمل تياراً i من خلال المعادلة $U_B = \frac{1}{2}Li^2$.
- يتذبذب التيار في دائرة المسار الواحد التي تحتوي على محث ومكثف بتردد نحصل عليه من خلال المعادلة $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$.
- يتذبذب التيار في دائرة المسار الواحد التي تحتوي على مقاوم ومحث ومكثف (RLC) بتردد نحصل عليه من خلال الصيغة $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ حيث $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - (R/2L)^2}$.
- تتذبذب الشحنة، q ، في المكثف في دائرة الحث والمكثف والمقاوم ذات المسار الواحد وتتناقص أسياً مع الزمن وفقاً للمعادلة $q = q_{\max} e^{-Rt/2L} \cos(\omega t)$ ، حيث q_{\max} الشحنة الابتدائية في المكثف.
- بالنسبة إلى دائرة المسار الواحد التي تحتوي على مصدر للقوة الدافعة الكهربائية، R ، يكون $V_R = I_R R$ ، حيث I_R الجهد والتيار، على الترتيب.
- بالنسبة إلى دائرة المسار الواحد التي تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية ترددها ω ومكثف، فإن $V_C = I_C X_C$ ، حيث V_C الجهد والتيار، على الترتيب، و $X_C = 1/\omega C$ المعادلة السعوية.
- بالنسبة إلى دائرة المسار الواحد التي تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية ترددها ω ومحث، فإن $V_L = I_L X_L$ ، حيث V_L الجهد والتيار، على الترتيب، و $X_L = \omega L$ المعادلة الحثية.
- بالنسبة إلى دائرة الحث والمكثف والمقاوم ذات المسار الواحد التي تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية ترددها ω فإن $V = IZ$ ، حيث V الجهد والتيار، على الترتيب، و $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ المعادلة.
- نحصل على ثابت الطور ϕ ، بين التيار والجهد في دائرة الحث والمكثف والمقاوم ذات المسار الواحد التي تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية ترددها ω من خلال $\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right)$.
- نحصل على متوسط القدرة في دائرة الحث والمكثف والمقاوم ذات المسار الواحد التي تحتوي على مصدر قوة دافعة كهربائية ترددها ω من خلال $\langle P \rangle = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \cos \phi$ ، حيث $I_{\text{rms}} = I_m / \sqrt{2}$ و $V_{\text{rms}} = V_m / \sqrt{2}$.
- كل التيارات، والجهود، والقدرات المستخدمة لدوائر التيار المتردد هي عادة قيم فعالة (الجذر التربيعي لمتوسط مربع الكميات rms).
- يمكن للمحول المكوّن من عدد N_p من لفات الملف الابتدائي وعدد N_s من لفات الملف الثانوي تحويل الجهد المتردد الابتدائي V_p إلى جهد متردد ثانوي، V_s ، نحصل عليه من خلال المعادلة $V_s = V_p \frac{N_s}{N_p}$ و نحصل عليه من خلال المعادلة $I_s = I_p \frac{N_p}{N_s}$ ثانوي، I_s .

إجابات أسئلة الاختبار الذاتي

10.5 تتناسب المقاومة عكسياً مع معكوس مساحة السلك ومن ثم تتناسب عكسياً مع مربع نصف القطر. لذا، إذا كان السلك أكثر سُمكاً بمقدار 10 أضعاف، فستقل المقاومة بمقدار 100 ضعف.



10.6

10.1 بالنسبة إلى هذه الدائرة، $\omega_0 = 2\pi f = 2\pi(200 \text{ kHz})$ و $q(0) = q_{\max}$ حيث $\text{rad/s} = 4\pi \times 10^5 \text{ rad/s}$ ؛ $\phi = 0$

(a) صواب ($\cos \omega_0 t = -1$)

(b) خطأ ($\sin \omega_0 t = 0$)

(c) خطأ ($\sin \omega_0 t = 0$ و $\cos \omega_0 t = -1$)

(d) خطأ ($\sin \omega_0 t = 1$ و $\cos \omega_0 t = 0$)

10.2 من الملاحظ أن k/m تقابل $1/LC$ ، وأن $b/2m$ تقابل $R/2L$. لذا فإن الحث، L ، يمثل الكتلة، m ، والسعة، C ، تقابل ثابت الزنبرك، $1/k$ ، وتمثل المقاومة، R ، ثابت المضاءلة، b .

10.3 (a) صواب (b) صواب (c) خطأ

10.4 (a) صواب (b) صواب (c) خطأ

إرشادات حل المسائل

3. تذكر علاقات الطور لدوائر التيار المتردد: بالنسبة إلى المقاوم، يكون التيار والجهد متفقين في الطور؛ وبالنسبة إلى المكثف، يسبق التيار الجهد؛ وبالنسبة إلى الحث، يلي التيار الجهد.
4. جُمع المتجهات الطورية باستخدام عمليات المتجهات، لا باستخدام العمليات الحسابية القياسية البسيطة. وعندما تُستخدم المتجهات الطورية لإيجاد التيار أو الجهد، تحقق من النتائج عن طريق التحقق من علاقات الطور الموضحة في الإرشادات السابقة.
5. عادةً، يكون التعامل مع التردد الزاوي (ω) أسهل من التعامل مع التردد (f) عند تحليل دوائر التيار المتردد. وفي أغلب الأحيان، ستشتمل معطيات المسألة على تردد زاوي، لكن إذا اشتملت المعطيات على تردد f ، فقم بتحويله إلى تردد زاوي ω عن طريق ضربه في 2π .

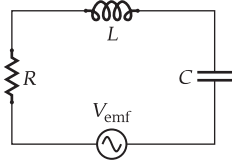
1. تتطلب منك معظم المسائل المتعلقة بدوائر التيار المتردد حساب المقاومة أو المفاعلة السعوية أو المفاعلة الحثية أو المعاوقة. تأكد من فهمك لكل كمية من هذه الكميات وكيفية استخدامها في حساب التيارات والجهد.
2. ستحتاج غالبًا إلى التمييز بين التيار أو الجهد اللحظي في الدائرة والقيم الفعالة أو أقصى قيمة للتيار أو الجهد. والقاعدة المعروفة هي استخدام الحرفين الصغيرين i و v للقيمتين اللحظيتين، واستخدام الحرفين الكبيرين I و V للقيمتين الثابنتين (مع استخدام الرموز السفلية حسب الضرورة). تأكد أيضًا من استخدام ترميز واضح بحيث لا يختلط عليك الأمر عند إجراء العمليات الحسابية.

أسئلة الاختيار من متعدد

نطاق التردد هذا؟ بصيغة أخرى، ما قيمة C_H/C_L ، حيث C_H السعة لأعلى تردد، و C_L السعة لأقل تردد؟

- (a) 9.59 (b) 0.104
(c) 0.568 (d) 1.76

10.7 في دائرة الحث والمكثف والمقاوم الموضحة في الشكل، إذا كان $R = 60 \Omega$ و $L = 3 \text{ mH}$ و $C = 4 \text{ mF}$ ، وكان أقصى جهد لمصدر القوة الدافعة الكهربائية هو 120 V ، فما قيمة التردد الزاوي، ω ، اللازمة لإنتاج أقصى تيار في المقاوم؟



- (a) 4.2 rad/s (b) 8.3 rad/s
(c) 204 s (d) 289 rad/s
(e) 5000 rad/s (f) 20,000 rad/s

10.8 تحمل مقاييس الحائط القياسية الموصق 220 V بشير هذا الملصق إلى _____ للجهد.

- (a) القيمة المتوسطة (b) القيمة القصوى
(c) القيمة الفعالة (d) القيمة اللحظية

10.9 تحتوي دائرة على مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن. نحصل عليها من خلال $V_{\text{emf}} = 120.0 \sin(377 \text{ rad/s}t) \text{ V}$ ، وعلى مكثف سعته $C = 5.00 \mu\text{F}$. ما مقدار التيار المار في الدائرة عند $t = 1.00 \text{ s}$ ؟

- (a) 0.226 A (b) 0.451 A
(c) 0.555 A (d) 0.750 A
(e) 1.25 A

10.10 يعطي مصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن جهدًا مقداره $V_{\text{max}} = 115.0 \text{ V}$ عند $f = 60.0 \text{ Hz}$ في دائرة توصيل حث ومكثف ومقاوم على التوالي. حيث، $R = 374 \Omega$ و $L = 0.310 \text{ H}$ و $C = 5.50 \mu\text{F}$. ما معاوقة هذه الدائرة؟

- (a) 321 Ω (b) 523 Ω
(c) 622 Ω (d) 831 Ω
(e) 975 Ω

10.1 مقاوم قوته 200Ω ومحث معامل حثه 40.0 mH ومكثف سعته $3.0 \mu\text{F}$ موصولين على التوالي بمصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن يعطي جهدًا 10.0 V عند تردد 1000 Hz . ما معاوقة الدائرة؟

- (a) 200Ω (b) 228Ω
(c) 342Ω (d) 282Ω

10.2 ما قيمة f التي تحقق $X_L > X_C$ ؟
(a) $f > 2\pi(LC)^{1/2}$ (b) $f > (2\pi LC)^{-1}$
(c) $f > (2\pi(LC)^{1/2})^{-1}$ (d) $f > 2\pi LC$

10.3 أي العبارات التالية صحيحة عن علاقة الطور بين المجالين الكهربائي والمغناطيسي في دائرة الحث والمكثف؟

- (a) عندما يكون مجال واحد عند أقصى قيمة له، يكون الآخر عند أقصى قيمة له أيضًا، وينطبق ذلك على القيم الصغرى.
(b) عندما يكون مجال واحد عند أقصى شدة له، يكون الآخر عند أقل شدة له (صفر).
(c) تعتمد علاقة الطور بشكل عام على قيمتي L و C .

10.4 بالنسبة إلى مرشح إمرار النطاق الموضح في الشكل 10.25، كيف يمكن زيادة عرض الاستجابة الترددية؟

- (a) بزيادة R_1 (b) بتقليل C_1
(c) بزيادة R_2 (d) بزيادة C_2
(e) بأي مما سبق

10.5 يعتمد ثابت الطور، ϕ ، بين الجهد والتيار في دائرة التيار المتردد على _____.

- (a) المفاعلة الحثية (b) المفاعلة السعوية
(c) المقاومة (d) جميع ما سبق
- 10.6 يغطي نطاق راديو AM نطاق التردد من 520 kHz إلى 1610 kHz . افترض وجود محث ثابت في دائرة محث ومكثف بسيطة، ما نسبة السعة اللازمة لتغطية

أسئلة مفاهيمية

10.13 في دائرة التيار المباشر المحتوية على مكثف، لن يتدفق التيار في الدائرة إلا لفترة زمنية قصيرة جدًا أثناء شحن المكثف أو تفريغ شحنته، وعلى الجانب الآخر، سيتدفق تيار متردد ثابت في دائرة تحتوي على المكثف نفسه لكن تعمل بمصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن. هل يعني ذلك أن الشحنات تعبر فجوة (عازل) المكثف؟

10.11 ما معاوقة دائرة توصيل الحث والمكثف والمقاوم على التوالي عند ضبط تردد القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن على تردد الرنين للدائرة؟

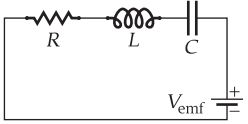
10.12 احسب الطاقة المخزنة الكلية في مساحة 5.00 km فوق سطح الأرض إذا كان متوسط شدة المجال المغناطيسي على سطح الأرض حوالي $0.500 \times 10^{-4} \text{ T}$.

10.21 على طول طريق بين مدينتين، يوجد عدد كبير من أبراج البث الإذاعي. وعلى عكس المتوقع، فإن الاستقبال اللاسلكي رديء هناك، وغالبًا ما تتداخل محطات غير مرغوب فيها مع المحطة التي تم ضبطها. بالنظر إلى موالف راديو السيارة على أنه مولدذبذبات رنان - يتم ضبط تردده الرنان على تردد المحطة المرغوبة - اشرح ظاهرة التداخل هذه.

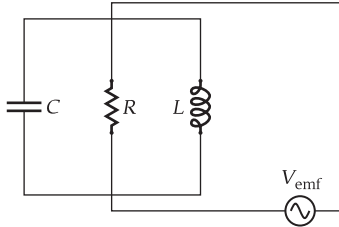
10.22 دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي تكون في حالة الرنين عند تشغيلها بجهد جيبى عند ترددها الرنان، $\omega_0 = (LC)^{-1/2}$. لكن إذا تم تشغيل الدائرة نفسها بجهد موجة مربعة (الذي يعمل ويتوقف بالتناوب لفترات زمنية متساوية)، فسُتحدث رنينًا عند ترددها الرنان، وعند $\frac{1}{3}$ ، $\frac{1}{5}$ ، $\frac{1}{7}$ ، ... من هذا التردد. اشرح السبب.

10.23 هل من الممكن للقيمة القصوى للجهد عبر الحث في دائرة محث ومكثف ومقاوم موصولة على التوالي أن تتجاوز القيمة القصوى لجهد المصدر؟ لماذا أو لم؟ لا؟

10.24 لماذا لا يمكن استخدام الحث لرفع الجهد أو خفضه في دائرة التيار المستمر؟



10.25 يوضح الشكل دائرة ذات مصدر قوة دافعة كهربائية ثابتة متصل على التوالي بمقاوم ومحث ومكثف. ما مقدار تدفق التيار الثابت في الدائرة؟



10.26 دائرة ذات محث ومكثف ومقاوم موصولين على التوالي. كما هو موضح في الشكل، ومزودة بمصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن يعطي بهذا V_{rms} عند تردد f . أوجد تعبيرًا لإيجاد I_{rms} بدلالة V_{rms} و f و L و C و R .

10.14 في دائرة الحث والمقاوم (RL) ذات التيار المتردد، يلي التيار الجهد. ماذا يعني ذلك؟ وكيف يمكن تفسيره نوعيًا وفقًا لمظاهره الحث الكهرومغناطيسي؟

10.15 في المسألة المحلولة 10.3، الجهد الذي ينتجه مصدر القوة الدافعة الكهربائية هو 33.0 V، والجهد عبر المقاوم هو $V_R = IR = 13.1$ V، والجهد عبر الحث هو $V_L = IX_L = 30.3$ V. هل تنطبق قواعد كيرشوف على هذه الدائرة؟

10.16 لماذا يتم تحديد القيمة الفعالة للقدرة، لا متوسط القدرة، في دائرة التيار المتردد؟

10.17 لماذا لا يمكننا استخدام شاحن عام يتم توصيله بمقبس منزلي لشحن كل الأجهزة الكهربائية - الهاتف الخليوي، ولعبة الكلب، والفتاحة، وما إلى ذلك - بدلًا من استخدام شاحن منفصل بحول خاص لكل جهاز؟

10.18 إذا كنت تستخدم مكثفًا ذا لوحين متوازيين بينهما فجوة هوائية كجزء من دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي في مولد، فسيمكنك قياس تدفق التيار عبر المولد. لماذا لا تعمل الفجوة الهوائية في المكثف كمفتاح مفتوح يمنع تدفق التيار بالكامل في الدائرة؟

10.19 من الأشكال الشائعة للأسلاك تلك الأزواج الملوقة أو المجدولة، على عكس أزواج الأسلاك المتوازية المستقيمة. ما الفائدة التقنية لاستخدام أزواج الأسلاك الملوقة مقارنة بالأزواج المتوازية المستقيمة؟

10.20 في عرض توضيحي في غرفة الصف، تم إدخال قلب حديدي في ملف لولبي كبير متصل بمصدر تيار متردد، والفرض من القلب هو تكبير المجال المغناطيسي في الملف اللولبي بالتعاذية المغناطيسية النسبية k_m ، للقلب (حيث k_m ثابت لا يعتمد). أكبر بكثير من وحدة المادة المغناطيسية الحديدية، التي مؤدنا لها في الوحدة (8) أو، على نحو مكافئ، استبدال التعاذية المغناطيسية للحيز المطلق، μ_0 ، بالتعاذية المغناطيسية للقلب، $\mu = k_m \mu_0$.

(a) انخفضت القيمة الفعالة للتيار المقيس من حوالي 10 A إلى أقل من 1 A وظل عند القيمة الأقل. اشرح السبب.

(b) ماذا سيحدث إذا كان مصدر الطاقة تيارًا مستمرًا؟

تمارين

10.32 مكثف سعته 4.00-mF متصل على التوالي بمحث معامل حثته 7.00 mH. وتبلغ أقصى قيمة للتيار في الأسلاك بين المكثف والحث 3.00 A.

(a) ما الطاقة الكهربائية الكلية في هذه الدائرة؟
(b) اكتب تعبيرًا لإيجاد الشحنة في المكثف كدالة للزمن، مفترضًا أن المكثف مشحون بالكامل عند $t = 0$ s.

القسم 10.3

10.33 دائرة تحتوي على مكثف سعته 4.50 nF ومحث معامل حثته 4.00 mH. إذا وُضعت بعض الشحنة في البداية في المكثف، فسيتم إنتاج تيار متذبذب بتردد زاوي ω_0 . ما معامل التغير في هذا التردد الزاوي إذا تم توصيل مقاوم قوته 1.00-k Ω على التوالي مع المكثف والحث؟

10.34 دائرة محث ومكثف ومقاوم تحتوي على مقاوم 50.0Ω ومحث معامل حثته 1.00 mH. ما القيمة العظمى اللازمة ليكون ثابت الزمن في الدائرة (القيمة $1/e$) مساويًا للزمن الدوري للذبذبة؟ مثل الجهد عبر المقاوم كدالة للزمن.

10.35 تم شحن مكثف سعته $2.00 \mu\text{F}$ بالكامل من خلال توصيله ببطارية جهدها 12.0 V. ثم تم توصيل المكثف المشحون بالكامل على التوالي بمقاوم ومحث، حيث $R = 50.0 \Omega$ و $L = 0.200$ H. احسب التردد المتخامد للدائرة الناتجة.

10.36 تتكون دائرة محث ومكثف من مكثف سعته $C = 2.50 \mu\text{F}$ ومحث معامل حثته $L = 4.00$ mH. وشحن المكثف بالكامل باستخدام بطارية، ثم تم توصيله بالمحث. واستخدم كاشف الذبذبات لقياس تردد الذبذبات في الدائرة. ثم فتحت الدائرة ووُضِلَ مقاوم R ، على التوالي مع الحث والمكثف. وشحن المكثف بالكامل مرة أخرى باستخدام البطارية نفسها. ثم وُضِلَ بالدائرة. فُؤد أن التردد الزاوي للذبذبات المتخامدة في دائرة

يشير رقم المسألة الأزرق إلى وجود حل للمسألة في دليل حلول الطالب. وتشير الواحدة والنقطتان إلى زيادة مستوى صعوبة المسألة.

القسمان 10.1 و 10.2

10.27 بالنسبة إلى دائرة الحث والمكثف الموضحة في الشكل، $L = 32.0$ mH و $C = 45.0 \mu\text{F}$. وتم شحن المكثف إلى $q_0 = 10.0 \mu\text{C}$. وعند $t = 0$ ، تم إغلاق المفتاح. عند أي زمن تساوي الطاقة المخزنة في المكثف الطاقة المخزنة في الحث أولاً؟

10.28 مكثف سعته $2.00 \mu\text{F}$ سُحِن بالكامل عن طريق توصيله ببطارية جهدها 12.0 V. ثم تم توصيل المكثف المشحون بالكامل بمحث معامل حثته 0.250-H. احسب (a) أقصى تيار في الحث و (b) تردد ذبذبة دائرة الحث والمكثف.

10.29 تتكون دائرة محث ومكثف من محث معامل حثته 1.00-mH ومكثف مشحون بالكامل. وبعد 2.10 ms، وصلت الطاقة المخزنة في المكثف إلى نصف قيمتها الأصلية. ما مقدار القيمة العظمى؟

10.30 نحصل على التيار المتغير مع الزمن في دائرة محث ومكثف حيث $C = 10.0 \mu\text{F}$ من خلال $i(t) = (1.00\text{A})\sin(1200\pi t)$. حيث t بالثواني.

(a) عند أي زمن بعد $t = 0$ يصل التيار إلى أقصى قيمة له؟
(b) ما الطاقة الكلية للدائرة؟
(c) ما معامل الحث، L ؟

10.31 تم شحن مكثف سعته $10.0 \mu\text{F}$ بالكامل ببطارية جهدها 12.0 V ثم تم فصله عن البطارية وسمح له بتفريغ الشحنة عبر محث معامل حثته 0.200 H. أوجد الأزمنة الثلاثة الأولى عندما تكون الشحنة في المكثف $80.0 \mu\text{C}$. مفترضًا $t = 0$ لحظة توصيل المكثف بالحث.

الحث والمكثف والمقاوم أقل بنسبة 20.0% من التردد الزاوي للذبذبات في الدائرة الحث والمكثف.

- (a) أوجد مقاومة المقاوم.
(b) ما الزمن الذي سيستغرق بعد إعادة توصيل المكثف في الدائرة للوصول القيمة القصوى للتيار المتخامد عبر الدائرة إلى 50.0% من السعة الأولية؟
(c) كم عدد الذبذبات المتخامدة الكاملة التي ستحدث خلال هذا الزمن؟

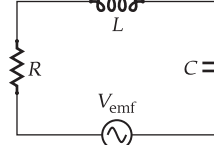
القسم 10.4

- 10.37 عند أي تردد تستصل مفاعلة مكثف سعته $10.0 \mu\text{F}$ إلى 200Ω X_C ؟
10.38 مكثف سعته $C = 5.00 \times 10^{-6} \text{ F}$ متصل بمصدر تيار متردد أقصى قيمة له 10.0 V وتردده $f = 100 \text{ Hz}$. أوجد مفاعلة المكثف وأقصى تيار في الدائرة.

القسم 10.5

10.39 دائرة موصلة على التوالي تحتوي على مقاوم قوته 100.0Ω ، ومحث معامل حثه 0.500 H ، ومكثف سعته $0.400 \mu\text{F}$ ، ومصدر قوة دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن يعطي جهداً مقداره 40.0 V .

- (a) ما تردد الرنين الزاوي للدائرة؟
(b) ما التيار الذي سيتدفق عبر الدائرة عند تردد الرنين؟
10.40 مكثف متغير مستخدم في دائرة محث ومكثف ومقاوم ينتج تردداً مقداره 5.0 MHz عند ضبط سعته على 15 pF . ماذا سيكون تردد الرنين عند زيادة السعة إلى 380 pF ؟



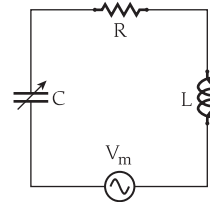
10.41 أوجد ثابت الطور ومعاوقة دائرة الحث والمكثف والمقاوم الموضحة في الشكل إذا كان تردد مصدر القوة الدافعة المتغيرة مع الزمن هو 1.00 kHz ، $R = 100 \Omega$ ، $L = 10.0 \text{ mH}$ ، و $C = 100 \mu\text{F}$ و $R = 100 \Omega$.

10.42 ما تردد الرنين لدائرة الحث والمكثف والمقاوم الموصولة على التوالي في المسألة 10.41 إذا كان $C = 4.00 \mu\text{F}$ ، $L = 5.00 \text{ mH}$ ، و $R = 1.00 \text{ k}\Omega$ وما أقصى تيار في الدائرة إذا كان $V_m = 10.0 \text{ V}$ عند تردد الرنين؟

10.43 في دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي، $V = (12.0 \text{ V})(\sin \omega t)$ ، و $R = 10.0 \Omega$ ، $L = 2.00 \text{ H}$ ، و $C = 10.0 \mu\text{F}$. أوجد القيمة العظمى للجهد عبر الحث في حالة الرنين. وهل النتيجة منطقية، إذا كانت القيمة العظمى للجهد المعطى للدائرة بأكملها هو 12.0 V ؟

10.44 مصدر تيار متردد جهده $V_m = 220 \text{ V}$ وتردده $f = 60.0 \text{ Hz}$ موصول في دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي. وقيم المقاومة، R ، ومعامل الحث، L ، والسعة C ، في هذه الدائرة هي 50.0Ω ، 0.200 H ، و 0.0400 mF على الترتيب. أوجد كلاً من الكميات التالية:

- (a) المفاعلة الحثية
(b) المفاعلة السعوية
(c) معاوقة الدائرة
(d) أقصى تيار عبر الدائرة عند هذا التردد
(e) أقصى فرق جهد عبر كل مكون للدائرة



10.45 تتكون دائرة توصيل الحث والمكثف والمقاوم على التوالي الموضحة في الشكل من $R = 2.20 \Omega$ ، $L = 9.10 \text{ mH}$ ، و $C = 2.27 \text{ mF}$ ، و $V_m = 110 \text{ V}$ ، و $\omega = 377 \text{ rad/s}$.

- (a) ما أقصى تيار I_m في الدائرة؟
(b) ما ثابت الطور، ϕ ، بين الجهد والتيار؟
(c) إذا كان من الممكن أن تتغير السعة، C ، فما قيمة C التي ستسمح بحدوث قيمة قصوى للتيار، وما مقدار هذا التيار، I_m ، ومقدار زاوية الطور، ϕ ، بين التيار والجهد؟

10.46 صمّم مرشح إمرار ترددات عالية مكوّنًا من مقاوم ومكثف يمرّ إشارة ذات تردد 5.00 kHz ، ونسبة فرق الجهد الخارج إلى الداخل فيه $V_{\text{out}}/V_{\text{in}} = 0.500$ ، وقيمة المعاوقة $1.00 \text{ k}\Omega$ عند الترددات العالية جدًا.

- (a) ما المكونات التي ستستخدمها؟
(b) ما طور V_{out} بالنسبة إلى V_{in} عند التردد 5.00 kHz ؟

10.47 صمّم مرشح إمرار ترددات عالية مكوّنًا من مقاوم ومكثف يمنع ضوءاً لخط التليفوني ذا التردد 60.0 Hz الناتج من دائرة مستخدمة في جهاز كشف. المعايير هي الحد من القيمة العظمى لضوء الخط بمعامل 1000 ومعاوقة كلية عند ترددات عالية $2.00 \text{ k}\Omega$.

- (a) ما المكونات التي ستستخدمها؟
(b) ما نطاق تردد الإشارات التي سيتم تمريرها عند 90.0% على الأقل من قيمتها العظمى؟

القسم 10.6

10.48 ما أقصى قيمة لجهد التيار المتردد حيث القيمة الفعالة له تساوي (a) 110 V أو (b) 220 V ؟

10.49 إذا كان يمكن إيجاد عامل الجودة Q ، لدائرة من خلال $Q = \omega_0(U_E + U_B)/P$ ، فعبر عن عامل الجودة لدائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على التوالي بدلالة المقاومة R ، ومعامل الحث L ، والسعة C .

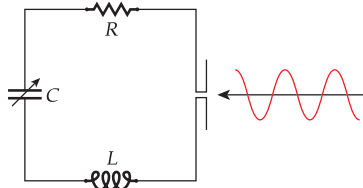
10.50 مجفف شعر يحمل الملصق "110V 1250W". ما أقصى تيار في مجفف الشعر، مفترضاً أنه يعمل كمقاوم؟

10.51 موالف راديو مقاومته $1.00 \mu\Omega$ ، وسعته 25.0 nF ، ومعامل حثه 3.00 mH .

- (a) أوجد تردد الرنين لهذا الموالف.
(b) احسب القدرة في الدائرة إذا كانت الإشارة عند تردد الرنين تنتج قوة دافعة كهربائية عبر هوائي بمقدار $V_{\text{rms}} = 1.50 \text{ mV}$.

10.52 تحتوي دائرة على مقاوم 100Ω ، ومحث معامل حثه 0.500 H ، ومكثف سعته $0.400 \mu\text{F}$ ، ومصدر قوة دافعة كهربائية موصول على التوالي. تتوافق القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن مع $V_{\text{rms}} = 50.0 \text{ V}$ عند تردد مقداره 2000 Hz .

- (a) أوجد التيار المار في الدائرة.
(b) أوجد انخفاض الجهد عبر كل مكون في الدائرة.
(c) ما مقدار القدرة التي يتم سحبها من مصدر القوة الدافعة الكهربائية؟



10.53 يوضح الشكل دائرة هوائي FM بسيطة حيث $L = 8.22 \mu\text{H}$ (يمكن ضبط المكثف C متغير لاستقبال محطة معينة). تنتج إشارة الراديو من محطة راديو FM المفضلة لديك قوة دافعة متغيرة جيبيًا مع الزمن قيمتها العظمى $12.9 \mu\text{V}$ وتردد 88.7 MHz في الهوائي.

- (a) ما قيمة، C_0 ، التي ينبغي أن تضبط المكثف عليها للحصول على أفضل استقبال لهذه الخطة؟
(b) تنتج إشارة محطة راديو أخرى قوة دافعة كهربائية متغيرة جيبيًا مع الزمن بالقيمة العظمى نفسها $12.9 \mu\text{V}$ ، لكن يتردد مقداره 88.5 MHz في الهوائي. عند ضبط الدائرة لتحسين الاستقبال عند تردد مقداره 88.7 MHz ، ما قيمة المقاومة، R_0 ، اللازمة لتقليل التيار الناتج عن الإشارة من هذه الخطة بمقدار النصف (مقارنةً بالتيار إذا تم تحسين الدائرة للاستقبال عند التردد 88.5 MHz)؟

القسم 10.7

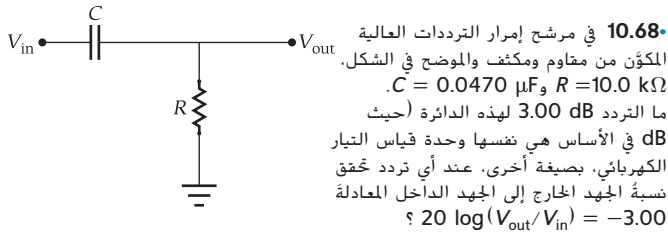
10.54 يُحدث نقل الطاقة الكهربائية عند أعلى جهد يمكن لتقليل الفقد. ما مقدار الفقد في الطاقة الذي يمكن تقليله برفع الجهد بمعامل 10.0؟

10.55 افترض أن الملف اللولبي والملف في المسألة المحلولة 9.2 محوّل.

(a) أوجد القيمة الفعالة للجهد في الملف إذا كانت القيمة الفعالة لجهد الملف اللولبي هو 120 V وكان تردده 60 Hz . طول الملف اللولبي يساوي 12.0 cm .

- (b) ما الجهد في الملف إذا كان التردد 0 Hz (تيار مستمر)؟
10.56 محوّل مكون من 800 لفة في الملف الابتدائي و 40 لفة في الملف الثانوي.

- (a) ماذا سيحدث إذا مر جهد متردد مقداره 100 V عبر الملف الابتدائي؟
(b) إذا كان التيار المتردد الابتدائي هو 5.00 A ، فما التيار الناتج في الملف الثانوي؟
(c) ماذا سيحدث إذا تدفق تيار مستمر عند جهد 100 V في الملف الابتدائي؟
(d) إذا كان التيار المستمر الابتدائي هو 5.00 A ، فما التيار الناتج في الملف الثانوي؟



10.68• في مرشح إمرار الترددات العالية

المكوّن من مقاوم ومكثف والموضح في الشكل. $C = 0.0470 \mu\text{F}$ و $R = 10.0 \text{ k}\Omega$.

ما التردد 3.00 dB لهذه الدائرة (حيث

في الأساس هي نفسها وحدة قياس التيار

الكهربائي، بصيغة أخرى، عند أي تردد تحقّق

نسبة الجهد الخارج إلى الجهد الداخل المعادلة

$$20 \log(V_{\text{out}}/V_{\text{in}}) = -3.00$$

10.69• لقد افترضت دراسة دوائر المكثف والمقاوم، ودوائر المقاوم والمكثف،

ودوائر الحث والمكثف والمقاوم في هذه الوحدة مقاومًا ذا مقاومة صفرية. حيث معامل

حته ومقدار سعته يساويان صفرًا. وبينما يمكن إهمال سعة المقاوم بشكل عام.

فإن الحث جزء لا يتجزأ من المقاوم. وإن واحدًا من أكثر المقاومات استخدامًا.

المقاوم السلكي الملفوف، ما هو إلا ملف لولبي مصنوع من سلك عالي المقاومة.

افترض مقاومًا سلكيًا ملفوفًا مقاومته مجهولة متصلًا بمصدر طاقة تيار مستمر.

وعند جهد مقداره $V = 10.0 \text{ V}$ عبر المقاوم، يكون مقدار التيار المار عبر المقاوم

هو 1.00 A . وبعد ذلك، وُضِّل المقاوم نفسه بمصدر طاقة تيار متردد يعطي جهدًا

هو $V_{\text{rms}} = 10.0 \text{ V}$ عند تردد متغير. وعندما كان مقدار التردد 20.0 kHz ، كان التيار

المعيس عبر المقاوم هو $I_{\text{rms}} = 0.800 \text{ A}$.

(a) احسب مقاومة المقاوم.

(b) احسب المفاعلة الحثية للمقاوم.

(c) احسب معامل حث المقاوم.

(d) احسب تردد مصدر طاقة التيار المتردد الذي عنده تتجاوز المفاعلة الحثية

للمقاوم مقاومته.

10.70• في دائرة حث ومكثف ومقاوم، وُضِّل مقاوم 20.0Ω ، ومحث معامل حته

10.0 mH ، ومكثف سعته $5.00 \mu\text{F}$ على التوالي بمصدر طاقة تيار متردد جهده

$V_{\text{rms}} = 10.0 \text{ V}$ وتردده $f = 100 \text{ Hz}$. احسب ما يلي:

(a) سعة التيار.

(b) الطور بين التيار والجهد.

(c) أقصى جهد عبر كل مكون.

10.71• حلقة سلكية قطرها 5.00 cm تحمل تيارًا مقداره 2.00 A . ما كثافة

الطاقة للمجال المغناطيسي عند مركز الحلقة؟

(b) ما التيار الذي يجب أن يتدفق في سلك مستقيم لإنتاج كثافة الطاقة نفسها عند

نقطة تبعد 4.00 cm عن السلك؟

10.72• يعمل مصباح كهربائي شدته 75000 W (نعم، توجد مصابيح بهذه

الشدّة!) عند تيار مقداره $I_{\text{rms}} = 200 \text{ A}$ وجهد مقداره $V_{\text{rms}} = 440 \text{ V}$ في دائرة

تيار متردد ترددها 60.0 Hz . أوجد المقاومة، R ، والحث الذاتي، L ، لهذا المصباح.

المفاعلة (التقوية) له ضئيلة جدًا.

10.73• أثبت أنّ القدرة المتبددة في مقاوم متصل بمصدر طاقة تيار متردد بتردد ω

تتذبذب بتردد 2ω .

10.74• مقاوم $100. \Omega$ وُضِّل على التوالي مع مكثف سعته $4.00 \mu\text{F}$ ومصدر قوة

دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن يعطي جهدًا مقداره $V_{\text{rms}} = 40.0 \text{ V}$.

(a) عند أي تردد سيكون انخفاض الجهد عبر المكثف مساويًا لانخفاض الجهد عبر

المقاوم؟

(b) ما القيمة الفعالة للتيار عبر الدائرة عندما يحدث ذلك؟

10.75• يتكوّن مغناطيس كهربائي من 200 لفة وطوله 10.0 cm ومساحة مقطعه

العرضي 5.00 cm^2 . أوجد تردد الرنين لهذا المغناطيس الكهربائي عند توصيله

بالأرض (افترض أن الأرض مكثف كروي).

10.76• تتطلب التجارب المعملية مع دوائر توصيل الحث والمكثف والمقاوم على

التوالي بعض الحذر، حيث يمكن أن تُنتج هذه الدوائر جهودًا كبيرة في حالة الرنين.

افترض أن لديك محثًا مقداره حته 1.00 H (من السهل الحصول عليه) ومجموعة

متنوعة من المقاومات والمكثفات. صمّم دائرة توصيل محث ومكثف ومقاوم على

التوالي تُحدث رنينًا عند تردد مقداره 60.0 Hz (ليس ترددًا زاويًا) لتعمل في حالة

الرنين على تكبير الجهد عبر المكثف أو الحث بمعامل 20.0 ضعف الجهد الداخل أو

الجهد عبر المقاوم.

10.77• تردد القطع لمرشح إمرار ترددات منخفضة مكوّن من مقاوم ومكثف هو

10.57 يحتوي محوّل على ملف ابتدائي مكوّن من 200 لفة وملف ثانوي مكوّن من

120 لفة. ويُنتج الملف الثانوي تيارًا I عبر مقاوم $1.00 \text{ k}\Omega$. إذا كان الجهد

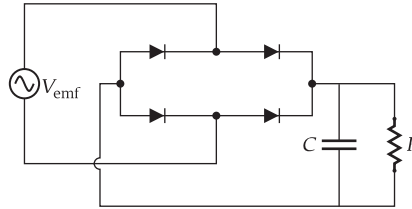
$V_{\text{rms}} = 75.0 \text{ V}$ عبر الملف الابتدائي، فما القدرة المتبددة في المقاوم؟

القسم 10.8

10.58 بالنظر إلى معوّم الموجة الكاملة المرشحة الموضح في الشكل، إذا كان مقدار

تردد مصدر القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة مع الزمن هو $60. \text{ Hz}$ ، فما تردد التيار

الناغ؟



10.59• يُذل جهد $V_{\text{rms}} = 110 \text{ V}$ عند تردد مقداره 60 Hz للملف الابتدائي لمحوّل.

ونسبة عدد لفات الملف الابتدائي إلى عدد لفات الملف الثانوي في المحوّل هي N_p/N_s

$= 11$. ويُستخدم الملف الثانوي كمصدر للقوة الدافعة الكهربائية V_{emf} لمعوّم الموجة

الكاملة المرشحة في المسألة 10.58.

(a) ما أقصى قيمة للجهد في الملف الثانوي للمحوّل؟

(b) ما جهد التيار المستمر المُعطى للمقاوم؟

تمارين إضافية

10.60 يمكن اعتبار محرك المكثفة الكهربائية كمحث معامل حته $100. \text{ mH}$. إذا

كان جهد التيار المتردد عند تردد 60.0 Hz هو $V_{\text{rms}} = 115. \text{ V}$ ، فما سعة المكثف

الذي يجب أن يكون موصولًا على التوالي مع المحرك للحصول على أقصى قدرة

ناجّة للمكثفة الكهربائية؟

10.61 عندما تُلفّ قرص الراديو لضبطه على محطة معينة، فإنك تضبط مكثفًا

متغيرًا في دائرة محث ومكثف. افترض أنك قُيِّم بضبطه على محطة إذاعة AM

تُبثّ عند تردد 1000 kHz . وأنه يوجد محث معامل حته 10.0 mH في دائرة

الضبط. عند ضبطك للمحطة، ما سعة المكثف؟

10.62 دائرة محث ومكثف ومقاوم موصولة على التوالي تحتوي على مصدر قوة

دافعة كهربائية متغيرة مع الزمن يعطي جهدًا مقداره 12.0 V عند تردد f_0 ، وفيها

$C = 0.0500 \text{ mF}$ ، و $R = 100 \Omega$ ، و $L = 7.00 \text{ mH}$.

(a) ما تردد الرنين لهذه الدائرة؟

(b) ما متوسط القدرة المتبددة في المقاوم عند تردد الرنين هذا؟

10.63 ما أقصى قيمة لكل من (a) التيار و (b) الجهد عند توصيل مصباح كهربائي

متوهج قدرته 60 W (عند 110 V) بمقبس حائط مكتوب عليه 110 V ؟

10.64 مصدر قوة دافعة كهربائية تردده 360 Hz موصول في دائرة مكوّنة من

مكثف، ومحث معامل حته 25 mH ، ومقاوم 0.80Ω . ما قيمة C اللازمة

لكي يكون التيار والجهد متفقين في الطور؟

10.65 ما مقدار المقاومة في دائرة محث ومكثف ومقاوم فيها $L = 65.0 \text{ mH}$

و $C = 1.00 \mu\text{F}$ إذا فقدت الدائرة 3.50% من طاقتها الكلية في صورة طاقة حرارية

في كل دورة؟

10.66 صمّم محوّل مكوّن من 400 لفة في ملفه الابتدائي و 20 لفة في ملفه الثانوي

لإعطاء متوسط قدرة 1200 W بجهد أقصاه 60.0 V . ما أقصى تيار في الملف

الابتدائي؟

10.67 مكثف سعته $5.00 \mu\text{F}$ موصول على التوالي مع مقاوم 4.00Ω سُحّن

باستخدام بطارية جهدها 9.00 V لمدة طويلة عن طريق

غلق المفتاح (الموقع a)

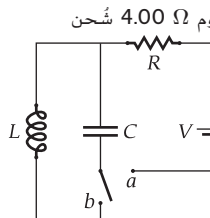
في الشكل. ثم فُزّعت شحنة المكثف عبر محث

(الموقع b) عن طريق إغلاق المفتاح (الموقع b)

عند $t = 0$.

(a) أوجد أقصى تيار يمر في الحث.

(b) ما أول زمن يصل فيه التيار إلى أقصى قيمة له؟



200. Hz. عند أي تردد سيكون ناتج قسمة الجهد الخارج على الجهد الداخل 0.100؟

10.78 محث معامل حثه $L = 42.1 \text{ mH}$ متصل بمصدر طاقة تيار متردد يعطي قوة دافعة كهربائية جهدها $V_{\text{emf}} = 19.1 \text{ V}$ عند تردد $f = 605 \text{ Hz}$. أوجد قيمة مفاعلة الحث.

10.79 محث معامل حثه $L = 52.5 \text{ mH}$ متصل بمصدر طاقة تيار متردد يعطي قوة دافعة كهربائية جهدها $V_{\text{emf}} = 19.9 \text{ V}$ عند تردد $f = 669 \text{ Hz}$. أوجد أقصى تيار في الدائرة.

10.80 محث معامل حثه L متصل بمصدر طاقة تيار متردد يعطي قوة دافعة كهربائية جهدها $V_{\text{emf}} = 20.7 \text{ V}$ عند تردد $f = 733 \text{ Hz}$. إذا كانت مفاعلة الحث تساوي 81.52Ω ، فما قيمة L ؟

10.81 محث معامل حثه L متصل بمصدر طاقة تيار متردد يعطي قوة دافعة كهربائية جهدها $V_{\text{emf}} = 21.5 \text{ V}$ عند تردد $f = 797 \text{ Hz}$. إذا كان أقصى تيار في الدائرة هو 0.1528 A ، فما قيمة L ؟

الموجات الكهرومغناطيسية

Electromagnetic Waves

11

290 ما سنتعلمه

- 290 11.1 قانون ماكسويل في الحث الكهرومغناطيسي
- 291 تيار الإزاحة
- 292 معادلات ماكسويل
- 293 11.2 الحلول الموجية لمعادلات ماكسويل
- 293 الحل المقترح
- 294 قانون جاوس للمجالات الكهربائية
- 294 قانون جاوس للمجالات المغناطيسية
- 294 قانون فاراداي للحث
- 296 قانون ماكسويل - أمبير
- 296 سرعة الضوء
- 297 11.3 الطيف الكهرومغناطيسي
- 297 نطاقات تردد البث الإذاعي والتلفازي و الاتصالات
- 299 الموجات الكهرومغناطيسية المتحركة
- 300 11.4 متجه بوينتج ونقل الطاقة
- 301 مثال 11.1 استخدام الألواح الشمسية
- 302 لشحن سيارة كهربائية
- المثال 11.2 القيمة الفعالة (rms) للمجالين الكهربائي والمغناطيسي الناتجين من ضوء الشمس
- 303 11.5 ضغط الإشعاع
- 303 مثال 11.3 ضغط الإشعاع
- 304 من مؤشر ليزر
- مسألة محلولة 11.1 الأفيار الصناعية الشمسية الثابتة
- 305 مسألة محلولة 11.2 الشراع الذي يعمل بالليزر
- 306 11.6 الاستقطاب
- 308 مثال 11.4 ثلاثة مرشحات استقطاب
- 309 مسألة محلولة 11.3 مرشحات الاستقطاب المتعددة
- 311 تطبيقات الاستقطاب
- 312 11.7 اشتقاق المعادلة الموجية
- 314 ما تعلمناه/ دليل المذاكرة للاختبار
- 315 إرشادات حل المسائل
- 316 أسئلة الاختيار من متعدد
- 317 أسئلة مفاهيمية
- 317 تمارين
- 320 تمارين بمعطيات متعددة



الشكل 11.1 منشأة الطاقة الشمسية Solúcar PS10 بالقرب من إشبيلية، إسبانيا. تعمل على تركيز الطاقة من الإشعاع الكهرومغناطيسي للشمس لإنتاج الكهرباء.

في الوحدات القليلة السابقة درسنا المجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية ورأينا كيف تتغير بمرور الزمن. تلخص هذه الوحدة دراستنا عن الكهرومغناطيسية وتركز على كيفية إنتاج الموجات الكهرومغناطيسية من خلال التفاعل بين المجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية.

تنتشر الموجات الكهرومغناطيسية في كل مكان على كوكب الأرض، وربما يكون أكثر أنواعها وضوحاً هو الضوء المرئي. تتراوح أنواع الموجات الكهرومغناطيسية الأخرى التي نعرفها بين موجات التلفزيون والراديو، والموجات متناهية الصغر والأشعة السينية. تستخدم الهواتف الخلوية واتصالات الإنترنت اللاسلكية ونظام تحديد المواقع العالمي (GPS) الموجات الكهرومغناطيسية، وكذلك مؤشرات الليزر. في هذه الوحدة، سندرس طبيعة الموجات الكهرومغناطيسية بما في ذلك أوجه الشبه والاختلاف بينها، ونقلها للطاقة والضغط إلى الأجسام الأخرى. تُعد محطات الطاقة الشمسية مثل الموضحة في الشكل 11.1، أمثلة مذهلة توضح كيفية الاستفادة من الطاقة التي تحملها الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة من الشمس.

تنطبق معظم النتائج في هذه الوحدة على الموجات الكهرومغناطيسية المنتشرة في الفراغ فقط. على الرغم من ذلك، يمكن التعامل مع الموجات الكهرومغناطيسية المنتشرة عبر الغلاف الجوي للكرة الأرضية بالطريقة نفسها لأغراض عملية. تُعد بعض الاختلافات الكبيرة بالنسبة إلى الموجات الكهرومغناطيسية المنتشرة عبر الوسائط الأخرى، ولكن لن نتناولها في هذه الوحدة.

الوحدة التالية هي أول وحدة تركز على البصريات - خصائص الضوء وسلوكه - ويتم تطبيق العديد من هذه الاختلافات على الموجات الكهرومغناطيسية الأخرى أيضاً.

ما سنتعلمه

- تستحث المجالات الكهربائية المتغيرة مجالات مغناطيسية، وتستحث المجالات المغناطيسية المتغيرة مجالات كهربائية.
- معادلات ماكسويل التي تصف الظواهر الكهرومغناطيسية.
- الموجات الكهرومغناطيسية لها مجالات كهربائية ومغناطيسية.
- يمكن التعبير عن حلول معادلات ماكسويل بدلالة الموجات المتحركة المتغيرة جيئياً.
- بالنسبة إلى الموجة الكهرومغناطيسية، يتعامد المجال الكهربائي على المجال المغناطيسي ويكون كلا المجالين متعامدين على اتجاه حركة الموجة.
- يمكن التعبير عن سرعة الضوء بدلالة الثوابت المرتبطة بالمجال الكهربائي والمجال المغناطيسي.
- الضوء عبارة عن موجة كهرومغناطيسية.
- يمكن أن تنقل الموجات الكهرومغناطيسية الطاقة وكمية الحركة.
- تناسب شدة الموجة الكهرومغناطيسية مع القيمة الفعالة للمجال الكهربائي للموجة.
- يُعرف اتجاه المجال الكهربائي للموجة الكهرومغناطيسية المتحركة باسم اتجاه الاستقطاب.

قانون ماكسويل في الحث الكهرومغناطيسي

11.1

Maxwell's Law of Induction for Induced Magnetic Fields

تعلّمنا أنّ تغير المجال المغناطيسي ينتج مجالاً كهربائياً. وفقاً لقانون فاراداي للحث،

$$(11.1) \quad \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

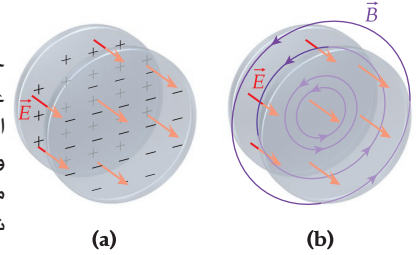
حيث يمثل \vec{E} المجال الكهربائي المستحث عبر حلقة مغلقة من خلال التدفق المغناطيسي المتغير، Φ_B . عبر هذه الحلقة. وبطريقة مماثلة، ينتج المجال الكهربائي المتغير مجالاً مغناطيسياً. يصف **قانون ماكسويل للحث الكهرومغناطيسي** (سمي بذلك نسبة إلى الفيزيائي البريطاني جيمس كلارك ماكسويل، 1811-1879) هذه الظاهرة كالتالي:

$$(11.2) \quad \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

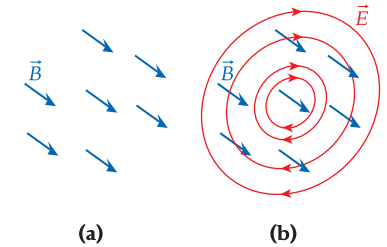
حيث يمثل \vec{B} المجال المغناطيسي المستحث عبر حلقة مغلقة من خلال التدفق الكهربائي المتغير، Φ_E . عبر هذه الحلقة. تماثل هذه المعادلة المعادلة 11.1 باستثناء الثابت $\mu_0 \epsilon_0$ وعدم وجود إشارة سالبة. يأتي الثابت نتيجة لوحدات النظام الدولي المستخدمة للإشارة إلى المجالات المغناطيسية. تشير حقيقة عدم وجود إشارة سالبة في الطرف الأيمن من المعادلة 11.2 إلى أنّ المجال المغناطيسي المستحث له إشارة مخالفة للإشارة المستخدمة في المجال الكهربائي المستحث عندما يجري حث المجالين في ظل الظروف نفسها كما لاحقاً.

أولاً، لاحظ أنّه لا يتضح إطلاقاً ما إذا كان يمكن كتابة المعادلة 11.2 بطريقة تقارنها بالمعادلة 11.1. عندما كتب ماكسويل هذه المعادلة للمرة الأولى، كانت بمثابة خطوة مهمة تجاه توحيد الكهرباء والمغناطيسية. اكتشف فاراداي قانونه في عام 1811. ولكن الأمر قد استغرق ربع قرن حتى جاء ماكسويل وتوصل إلى القانون المناظر. ما ذكره هنا بوصفه حقيقة بسيطة كان في الواقع الخطوة المفاهيمية الرائعة الأولى تجاه توحيد جميع القوى الفيزيائية في الطبيعة. بدأ هذا التوحيد بما اكتشفه ماكسويل منذ قرن ونصف ويستمر من خلال أبحاث الفيزياء الحالية.

يمكن استخدام مكثف دائري لتوضيح المجال المغناطيسي المستحث (الشكل 11.2). في المكثف الموضح في الشكل 11.2a، الشحنة ثابتة، ويوجد مجال كهربائي ثابت بين الألواح. ولا يوجد مجال مغناطيسي. في المكثف الموضح في الشكل 11.2b، تتزايد الشحنة بمرور الزمن. ومن ثمّ، يزداد التدفق الكهربائي بين الألواح بمرور الزمن. تمثل الحلقات الأرجوانية المجال المغناطيسي، \vec{B} . المستحث، وتشير أيضاً إلى اتجاه \vec{B} على امتداد كل حلقة. يكون لمتجه المجال المغناطيسي المقدار نفسه ويتجه في اتجاه مماسي مع الحلقة. عندما يتوقف تزايد الشحنة، يظل التدفق الكهربائي ثابتاً ويختفي المجال المغناطيسي. بعد ذلك، فكّر في مجال مغناطيسي منتظم وثابت أيضاً بمرور الزمن، كما في الشكل 11.3a. في الشكل 11.3b، لا يزال المجال المغناطيسي منتظماً في الفراغ لكنه يزداد بمرور الزمن، ما يؤدي إلى إنتاج



الشكل 11.2 (a) مكثف دائري مشحون. تمثل الأسهم الحمراء المجال الكهربائي بين الألواح. (b) مكثف تزيد شحنته بمرور الزمن. تمثل الأسهم الحمراء المجال الكهربائي، وتمثل الحلقات الأرجوانية المجال المغناطيسي المستحث.



الشكل 11.3 (a) مجال مغناطيسي منتظم ثابت. (b) مجال مغناطيسي منتظم يزداد بمرور الزمن، ما يؤدي إلى حث مجال كهربائي تمثله الحلقات الحمراء.

مجال كهربائي موضحاً بالحلقات الحمراء. يكون لمتجه المجال الكهربائي مقدار ثابت على امتداد كل حلقة ويتجه في اتجاه مماسي مع الحلقات كما هو موضح. لاحظ أنَّ هذا المجال الكهربائي المستحث يتجه في الاتجاه المعاكس للمجال المغناطيسي المستحث الناتج عن المجال الكهربائي المتزايد (الشكل 11.2b). تدَّكر الآن قانون أمبير:

$$(11.3) \quad \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{\text{enc}}$$

الذي يربط التكامل الحلقي لمتجه الضرب النقطي لمتجه المجال المغناطيسي في متجه متغير التكامل (الازاحة) التفاضلية على امتداد الحلقة، $\vec{B} \cdot d\vec{s}$ ، بالتيار المتدفق عبر الحلقة. وعلى الرغم من ذلك، أدرك ماكسويل أنَّ هذه المعادلة غير مكتملة لأنها لا تأخذ في الاعتبار تأثيرات المجالات الكهربائية المتغيرة في المجال المغناطيسي. يمكن دمج المعادلتين 11.2 و 11.3 لتقديم وصف للمجالات المغناطيسية الناتجة عن الشحنات المتحركة والمجالات الكهربائية المتغيرة:

$$(11.4) \quad \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i_{\text{enc}}$$

تسمى المعادلة 11.4 **بقانون ماكسويل - أمبير**. من الواضح أنَّه في الحالة التي يكون فيها التيار ثابتاً، مثل تدفق التيار في موصل ما، تُختصر هذه المعادلة لتصبح قانون أمبير. في الحالة التي يكون فيها المجال الكهربائي متغيراً من دون تدفق التيار، مثل المجال الكهربائي بين ألواح المكثف، تُختصر هذه المعادلة إلى قانون ماكسويل للحث. من المهم إدراك أنَّ قانون ماكسويل - أمبير يصف مصدرين مختلفين للمجال المغناطيسي: التيار الاصطلاحي (كما تمت مناقشتها في الوحدة 8) والتدفق الكهربائي المتغير بمرور الزمن (سيتم تناوله بمزيد من التفصيل في القسم الفرعي التالي).

تيار الإزاحة

بالنظر إلى قانون ماكسويل - أمبير (المعادلة 11.4)، يمكنك رؤية أنَّه يجب أن يتضمن التعبير $\epsilon_0 d\Phi_E/dt$ الموجود في الطرف الأيمن من المعادلة وحدات التيار. على الرغم من عدم وجود "تيار" تمت "إزاحته"، يسمى هذا المصطلح **بتيار الإزاحة**، i_d :

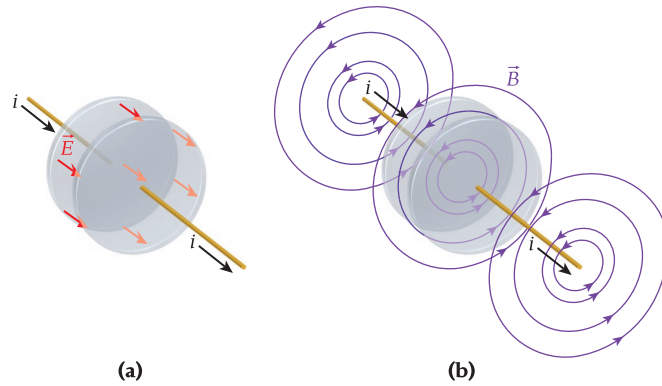
$$(11.5) \quad i_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

بهذا التعريف، يمكننا إعادة كتابة المعادلة 11.4 بالصورة

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 (i_d + i_{\text{enc}})$$

مرة أخرى، لنفكر في مكثف متوازي الألواح به ألواح دائرية، ومتصل الآن بدائرة في تدفق فيها التيار، i . أثناء شحن المكثف (الشكل 11.4)، في مكثف متوازي الألواح، ترتبط الشحنة، q ، بالمجال الكهربائي بين الألواح، E ، كما يلي (راجع الوحدة 4)

$$q = \epsilon_0 AE$$



الشكل 11.4 مكثف متوازي الألواح في دائرة يجري شحنها باستخدام تيار، i : (a) المجال الكهربائي بين الألواح في لحظة معينة؛ (b) المجال المغناطيسي حول الأسلاك وبين ألواح المكثف.

حيث يمثل A المساحة المشتركة بين الألواح. يمكن الحصول على التيار i في الدائرة من خلال حساب مشتقة الزمن لهذه المعادلة:

$$(11.6) \quad i = \frac{dq}{dt} = \epsilon_0 A \frac{dE}{dt}$$

بافتراض أن المجال الكهربائي بين ألواح المكثف منتظم، يمكننا الحصول على صيغة لتيار الإزاحة:

$$(11.7) \quad i_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \epsilon_0 \frac{d(AE)}{dt} = \epsilon_0 A \frac{dE}{dt}$$

ومن ثم، يكون التيار في الدائرة، i ، المعطى من خلال المعادلة 11.6 مساوياً لتيار الإزاحة، i_d ، المعطى من خلال المعادلة 11.7. على الرغم من عدم وجود تيار فعلي متدفق بين ألواح المكثف، بمعنى أنه لا توجد شحنات فعلية متحركة عبر فجوة المكثف من أحد اللوحين إلى الآخر، يمكن استخدام تيار الإزاحة لحساب المجال المغناطيسي المستحث.

لحساب المجال المغناطيسي بين اللوحين الدائريين في المكثف، نفترض أنه يمكن استبدال الحجم بين اللوحين بموصل بنصف قطره R ويحمل تياراً i_d . عرفنا في الوحدة 8، أنه يتم تحديد المجال المغناطيسي عند مسافة عمودية r من مركز المكثف بالمعادلة

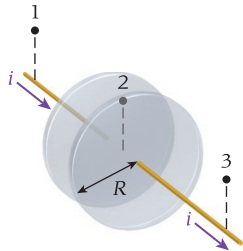
$$B = \left(\frac{\mu_0 i_d}{2\pi R^2} \right) r \quad (\text{حيث } r < R)$$

يمكن أن يُعامل النظام خارج المكثف باعتباره سلكاً حاملاً للتيار؛ ومن ثم يكون المجال المغناطيسي عند مسافة عمودية r من السلك

$$B = \frac{\mu_0 i_d}{2\pi r} \quad (\text{حيث } r > R)$$

مراجعة المفاهيم 11.2

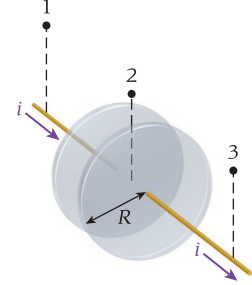
تيار الإزاحة، i_d ، لمكثف الشحن الدائري الذي نصف قطره R والموضح في الشكل يساوي تيار التوصيل، i . في الأسلاك، تقع النقطتان 1 و3 على مسافة عمودية r من الأسلاك، وتقع النقطة 2 على نفس المسافة العمودية r من مركز المكثف، بحيث يكون $r < R$. رتب المجالات المغناطيسية في النقاط 1 و2 و3، من الأكبر مقداراً إلى الأصغر.



- | | |
|----------------------|----------------------|
| a) $B_1 > B_2 > B_3$ | d) $B_2 > B_1 = B_3$ |
| b) $B_3 > B_2 > B_1$ | e) $B_1 = B_2 = B_3$ |
| c) $B_1 = B_3 > B_2$ | |

مراجعة المفاهيم 11.1

تيار الإزاحة، i_d ، لمكثف الشحن الدائري الذي نصف قطره R والموضح في الشكل يساوي تيار التوصيل، i . في الأسلاك، تقع النقطتان 1 و3 على مسافة عمودية r من الأسلاك، وتقع النقطة 2 على نفس المسافة العمودية r من مركز المكثف، بحيث يكون $r > R$. رتب الحقول المغناطيسية في النقاط 1 و2 و3، من الأكبر مقداراً إلى الأصغر.



- | | |
|----------------------|----------------------|
| a) $B_1 > B_2 > B_3$ | d) $B_2 > B_1 = B_3$ |
| b) $B_3 > B_2 > B_1$ | e) $B_1 = B_2 = B_3$ |
| c) $B_1 = B_3 > B_2$ | |

معادلات ماكسويل

يكمل قانون ماكسويل - أمبير (المعادلة 11.4) مجموعة المعادلات الأربع المعروفة باسم **معادلات ماكسويل**، التي تصف التفاعلات بين الشحنات الكهربائية والتيارات والمجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية. تتعامل هذه المعادلات مع الكهرباء والمغناطيسية بوصفهما مظهرين لقوة منتظمة تعرف باسم **الكهرومغناطيسية**. لا تزال النتائج الموضحة سابقاً عن الكهرباء والمغناطيسية صحيحة، ولكن هذه المعادلات توضح كيفية التفاعل بين المجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية، ما يؤدي إلى ظهور نطاق واسع من الظواهر الكهرومغناطيسية. تركز هذه الوحدة على الموجات الكهرومغناطيسية.

يوضح الجدول 11.1 تلخيص معادلات ماكسويل. (مرة أخرى، على سبيل

التذكير، يمثل $\oint \vec{A} \cdot d\vec{A}$ في المعادلتين الأولى والثانية التكامل عبر سطح مغلق، ويشير $\oint \vec{A} \cdot d\vec{s}$ في المعادلتين الأخيرتين إلى التكامل عبر مسار مغلق).

إذا أمعنت النظر في معادلات ماكسويل، يمكنك ملاحظة عدم التماثل بين \vec{E} و \vec{B} ينشأ هذا الاختلاف عن حقيقة وجود الشحنات الكهربائية منعزلة، وظهور تيار مناظر عند تحرك الشحنات، ولكن من الواضح أنه لا توجد أقطاب مغناطيسية معزولة أو متفردة في الطبيعة. تسمى الجسيمات

الاسم	المعادلة	الوصف
قانون جاوس للمجالات الكهربائية	$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$	يتناسب التدفق الكهربائي الكلي عبر سطح مغلق مع الشحنة الكهربائية الكلية المحصورة.
قانون جاوس للمجالات المغناطيسية	$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	التدفق المغناطيسي الكلي عبر سطح مغلق يساوي صفرًا (لا توجد أقطاب مغناطيسية أحادية).
قانون فاراداي للحث	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	إنتاج مجال كهربائي بالحث من خلال تدفق مغناطيسي متغير.
قانون ماكسويل - أمبير	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i_{enc}$	إنتاج مجال مغناطيسي بالحث من خلال تدفق كهربائي متغير أو بواسطة تيار.

التي يُفترض أنَّ لها شحنة مغناطيسية واحدة (قطب شمالي أو قطب جنوبي، ولكن ليس كلاهما) **أقطابًا مغناطيسية منفردة**، ولكن من الناحية التجريبية، توجد الأقطاب المغناطيسية مزدوجة دائمًا، ما يعني وجود قطب شمالي وقطب جنوبي معًا. لا يوجد سبب جوهري لعدم وجود أقطاب مغناطيسية منفردة، ولم إجراء العديد من التجارب للبحث عنها ولكن دون جدوى. تُعد تجربة مرصد الأشعة الكونية والفيزياء الفلكية والأقطاب الأحادية (MACRO) إحدى أكثر هذه التجارب حساسية، حيث استخدمت كاشفًا هائلًا عمل لسنوات طويلة في مختبر يوجد في مستوطني عميق تحت جبل غران ساسو في إيطاليا. بحث مرصد الأشعة الكونية والفيزياء الفلكية والأقطاب الأحادية (MACRO) عن الأقطاب المنفردة المغناطيسية في الأشعة الكونية ولكنه لم يجد شيئًا.

سنبدأ الآن دراستنا **للموجات الكهرومغناطيسية**. تتكون الموجات الكهرومغناطيسية من المجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية، ويمكن أن تنتقل في الفراغ من دون أي وسط داعم، ولا تشتمل على تيارات أو شحنات متحركة. تم اكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية لأول مرة في عام 1888 من قبل الفيزيائي الألماني هاينريش هرتز (1857-1894). استخدم هرتز دائرة محث ومكثف ومقاوم (RLC) تنتج تيارًا في محث ينتج فجوة شرارة. تتكون فجوة الشرارة من قطبين كهربائيين ينتجان شرارة من خلال استئثار الغاز بينهما عند توصيل فرق جهد عبرهما. وضع هرتز حلقة وفجوة شرارة صغيرة على بُعد عدة أمتار. لاحظ أنَّ الشرارات تجت في الحلقة البعيدة بنمط مرتبط بالتذبذبات الكهرومغناطيسية في الحث والمكثف والمقاوم (RLC) الأساسية. ومن ثمَّ، كانت الموجات الكهرومغناطيسية قادرة على التحرك في الفراغ من دون أي وسط لدعمها. ولهذه الإسهامات وغيرها، تمت تسمية الوحدة الأساسية للتذبذب، اهتزازة في الثانية، باسم الهرتز (Hz) تكريمًا له.

11.2 الحلول الموجية لمعادلات ماكسويل

Wave Solutions to Maxwell's Equations

كما سيوضح القسم 11.7، يمكن استخدام حساب التفاضل والتكامل المتقدم لاستنتاج معادلة عامة للموجة من معادلات ماكسويل بدءًا بهذه المعادلات في الشكل التفاضلي. على الرغم من ذلك، سنفترض أولاً أنَّ الموجات الكهرومغناطيسية التي تنتشر في الفراغ (حيث لا توجد تيارات أو شحنات متحركة) لها صيغة الموجات المتحركة ونثبت أنَّ هذه الصيغة تحقق معادلات ماكسويل.

الحل المقترح

نفترض أنَّ المعادلات التالية تعبر عن المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي في موجة كهرومغناطيسية معينة تتحرك في اتجاه المحور x الموجب:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_{\max} \sin(\kappa x - \omega t) \hat{y}$$

9

$$(11.8) \quad \vec{B}(\vec{r}, t) = B_{\max} \sin(\kappa x - \omega t) \hat{z}$$

حيث يمثل $\kappa = 2\pi/\lambda$ العدد الموجي ويمثل $\omega = 2\pi f$ التردد الزاوي لموجة طولها الموجي λ وترددها f . لاحظ أنَّ مقداري كلا المجالين لا يعتمدان على الإحداثيين y أو z ، ولكنهما يعتمدان فقط على الإحداثي x والزمن. يسمى هذا النوع من الموجات، حيث يقع متجهها المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي في المستوى، **بالموجة المستوية**. تشير المعادلة 11.8 إلى أنَّ هذه الموجة الكهرومغناطيسية المعينة تتحرك في اتجاه x

الموجب لأنه كلما زاد الزمن t ، لزم أن يزيد الإحداثي x للحفاظ على القيمة نفسها للمجالين. يوضح الشكل 11.5 الموجة الموضحة بالمعادلة 11.8.

في الحالة الموضحة في الشكل 11.5، يتحرك المجال الكهربائي بالكامل في الاتجاه y ويتحرك المجال المغناطيسي بالكامل في الاتجاه z ؛ ما يعني أن المجالين متعامدان على اتجاه انتشار الموجة. تبين أن المجال الكهربائي يتعامد دائمًا على اتجاه حركة الموجة، وكذلك يتعامد دائمًا على المجال المغناطيسي. على الرغم من ذلك، وبوجه عام، بالنسبة إلى أي موجة كهرومغناطيسية تنتشر على امتداد المحور x ، يمكن أن يتجه المجال الكهربائي في أي اتجاه على المستوى yz . يُعد تمثيل الموجة في الشكل 11.5 تصورًا لحظيًا.

تمثل المتجهات الموضحة مقدار المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي واتجاهيهما؛ ومع ذلك، يجب أن تدرك أن هذين المجالين ليسا من الأجسام الصلبة. لا يوجد أي عنصر مصنوع من المادة يتحرك فعليًا إلى اليسار واليمين أو إلى أعلى وأسفل مثل الموجات. تمثل المتجهات المتجهة إلى اليسار واليمين وإلى أعلى وأسفل المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي. يتضمن إثبات أن الموجة المتحركة الموضحة بالمعادلة 11.8 تحقق كل معادلات ماكسويل القليل من حساب التفاضل والتكامل للمتجهات، ويتضمن أيضًا المفاهيم التي تعلمناها في الوحدات السابقة. سنتناول الأقسام الفرعية التالية هذه العملية بالتفصيل، معادلة تلو الأخرى.

قانون جاوس للمجالات الكهربائية

لنبدأ بقانون جاوس للمجالات الكهربائية. بالنسبة إلى الموجة الكهرومغناطيسية المتحركة في الفراغ، لا توجد شحنة محصورة في أي مكان ($q_{\text{enc}} = 0$)، ومن ثمَّ يجب توضيح أن الحل المقترح للمعادلة 11.8 يحقق

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (11.9)$$

نختار صندوقًا مستطيلًا بوصفه سطحًا جاوسيًا يتضمن جزءًا من التمثيل المتجهي للموجة (الشكل 11.6). بالنسبة إلى وجهي الصندوق في المستوى yz ، تكون قيمة $\vec{E} \cdot d\vec{A}$ صفرًا لأنَّ المتجهين \vec{E} و $d\vec{A}$ متعامدان. ينطبق الأمر نفسه على الوجهين في المستوى xy . يمثل الوجهان في المستوى xz القيمتين $EA_1 + EA_1 - EA_1$ ، حيث يمثل A_1 مساحة الوجه العلوي والوجه السفلي. ومن ثمَّ، يكون التكامل صفرًا، ويتحقق قانون جاوس للمجالات الكهربائية.

إذا حللنا التمثيل المتجهي في أوقات مختلفة، فسنحصل على مجال كهربائي مختلف. وعلى الرغم من ذلك، نظرًا لتحرك المجال الكهربائي دائمًا في اتجاه y ، فإنَّ التكامل يساوي صفرًا دائمًا.

قانون جاوس للمجالات المغناطيسية

بالنسبة إلى قانون جاوس للمجالات المغناطيسية، يجب إثبات أنَّ

$$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (11.10)$$

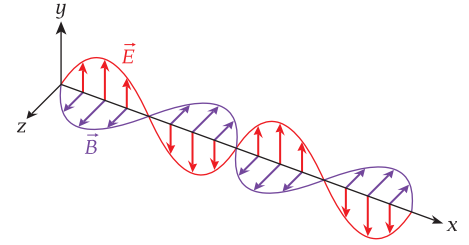
نستخدم مرة أخرى السطح المغلق في الشكل 11.6 للتكامل. بالنسبة إلى وجهي الصندوق في المستوى yz ، وبالنسبة إلى الوجهين في المستوى xz ، تكون قيمة $\vec{B} \cdot d\vec{A}$ صفرًا لأنَّ المتجهين \vec{B} و $d\vec{A}$ متعامدان. يمثل الوجهان في المستوى xy القيمتين $BA_2 + BA_2 - BA_2$ ، حيث يمثل A_2 مساحة كل من الوجهين في المستوى xy . ومن ثمَّ، يكون التكامل صفرًا، ويتحقق قانون جاوس للمجالات المغناطيسية.

قانون فاراداي للحث

لنتناول الآن قانون فاراداي للحث:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (11.11)$$

لتقييم التكامل في الطرف الأيسر من هذه المعادلة، سنفترض وجود حلقة مغلقة في المستوى xy عرضها dx وارتفاعها h وتمر في الاتجاه من a إلى b إلى c إلى d ثمَّ تعود مرة أخرى إلى a . كما هو موضح على المستطيل الرمادي في الشكل 11.7، تشتمل مشتقة المساحة $d\vec{A} = \hat{n}dA = \hat{n}hdx$ لهذا المستطيل على متجه وحدة المساحة العمودي على السطح، \hat{n} . ويتجه في اتجاه z الموجب. لاحظ أنَّ المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي يتغيران بتغير المسافة على امتداد المحور x . ومن ثمَّ، عند الانتقال من النقطة x إلى النقطة $x + dx$ ، فإنَّ المجال الكهربائي يتغير من $\vec{E}(x)$ إلى $\vec{E}(x) + d\vec{E}$. لتقييم تكامل المعادلة 11.11 عبر الحلقة المغلقة، نقسم الحلقة إلى أربعة أجزاء، مع حساب التكامل في عكس اتجاه عقارب الساعة من a إلى b ، ومن b إلى c ، ومن c إلى d ، ومن d إلى a . تساوي أجزاء التكامل الموازية للمحور x ، من صيغة التكامل من النقطة b إلى c ومن d إلى a ، صفرًا لأنَّ المجال الكهربائي متعامد دائمًا على اتجاه التكامل. بالنسبة إلى التكاملات في اتجاه y ، ومن a إلى b ومن c إلى

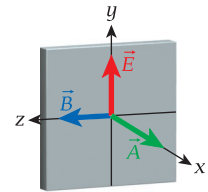


الشكل 11.5 تمثيل لموجة كهرومغناطيسية تسير في اتجاه x الموجب في لحظة معينة.

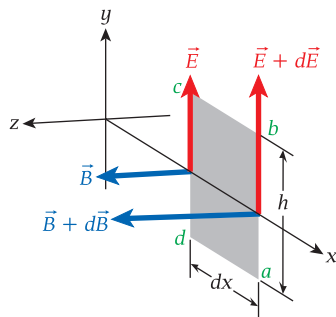
مراجعة المفاهيم 11.3

موجة كهرومغناطيسية مستوية تنتقل عبر الفراغ. يتم تحديد المجال الكهربائي للموجة بواسطة $\vec{E} = E_{\text{max}} \cos(\kappa x - \omega t) \hat{y}$ أي من المعادلات التالية تصف المجال المغناطيسي للموجة؟

- $\vec{B} = B_{\text{max}} \cos(\kappa x - \omega t) \hat{x}$
- $\vec{B} = B_{\text{max}} \cos(\kappa y - \omega t) \hat{y}$
- $\vec{B} = B_{\text{max}} \cos(\kappa z - \omega t) \hat{z}$
- $\vec{B} = B_{\text{max}} \cos(\kappa y - \omega t) \hat{z}$
- $\vec{B} = B_{\text{max}} \cos(\kappa x - \omega t) \hat{z}$



الشكل 11.6 سطح جاوسي (المربع الرمادي) حول جزء من التمثيل المتجهي للموجة الكهرومغناطيسية المتحركة في اتجاه x الموجب. ويوضح الشكل متجه المساحة للوجه الأمامي من السطح الجاوسي.



الشكل 11.7 صورتان للمجالين

الكهربائي والمغناطيسي في موجة كهرومغناطيسية. تمثل المنطقة الرمادية حلقة تكامل لقانون فاراداي.

d . يكون المجال الكهربائي باتجاه موازي مع أو عكس اتجاه التكامل؛ ومن ثم، يُختصر ناتج الضرب القياسي إلى ناتج الضرب الاعتيادي. نظرًا لاستقلال المجال الكهربائي عن الإحداثي y ، يمكن استيعاده من التكامل. ومن ثم، يكون التكامل على امتداد كل جزء في الاتجاه y ناتجًا بسيطًا للتكاملية (مقدار المجال الكهربائي على الإحداثي x المناظر) وطول حدود التكامل (h). مضروبًا في -1 للتكامل في اتجاه y السالب لأن E عكس اتجاه التكامل. ومن ثم، تكون قيمة تكامل المعادلة 11.11 هي

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = E \int_a^b ds - E \int_c^d ds = (E + dE)(h) - Eh = (dE)(h)$$

يتم الحصول على الطرف الأيمن من المعادلة 11.11 كما يلي

$$-\frac{d\Phi_B}{dt} = -A \frac{dB}{dt} = -(h)(dx) \frac{dB}{dt}$$

حيث يمثل dt الزمن الذي تتحرك خلاله الموجة مسافة dx . ومن ثم، نحصل على

$$(h)(dE) = -(h)(dx) \frac{dB}{dt}$$

أو

$$(11.12) \quad \frac{dE}{dx} = -\frac{dB}{dt}$$

يتم أخذ المشتقات dE/dx و dB/dt كل منها بالنسبة إلى متغير واحد، على الرغم من أن E و B يعتمدان على x و t . ومن ثم، يمكننا كتابة المعادلة 11.12 بطريقة أكثر ملاءمة باستخدام المشتقات الجزئية:

$$(11.13) \quad \frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

باستخدام الأشكال الافتراضية للمجالين الكهربائي والمغناطيسي (المعادلة 11.8)، يمكننا توسيع المشتقات الجزئية:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (E_{\max} \sin(\kappa x - \omega t)) = \kappa E_{\max} \cos(\kappa x - \omega t)$$

و

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (B_{\max} \sin(\kappa x - \omega t)) = -\omega B_{\max} \cos(\kappa x - \omega t)$$

ينتج عن التعويض بهذين التعبيرين في المعادلة 11.13

$$\kappa E_{\max} \cos(\kappa x - \omega t) = -[-\omega B_{\max} \cos(\kappa x - \omega t)]$$

يرتبط التردد الزاوي والعدد الموجي بالعلاقة

$$(11.14) \quad \frac{\omega}{\kappa} = \frac{2\pi f}{(2\pi/\lambda)} = f\lambda = c$$

حيث يمثل c سرعة الموجة. (بوجه عام، يمكننا استخدام v للدلالة على سرعة الموجة، ولكن نختار استخدام c ، لأن كل الموجات الكهرومغناطيسية، كما سنرى، تنتشر في الفراغ بسرعة مميزة وهي سرعة الضوء التي يشار إليها بالرمز c عادةً). ومن ثم، نحصل على

$$\frac{E_{\max}}{B_{\max}} = \frac{\omega}{\kappa} = c$$

يمكننا استخدام المعادلة 11.8 لإعادة كتابة هذه المعادلة بدلالة نسبة مقادير المجالات عند مكان وزمن ثابتين بالصورة

$$(11.15) \quad \frac{E}{B} = \frac{|\vec{E}(\vec{r}, t)|}{|\vec{B}(\vec{r}, t)|} = \frac{E_{\max} |\sin(\kappa x - \omega t)|}{B_{\max} |\sin(\kappa x - \omega t)|} = c$$

ومن ثَمَّ، تحقق المعادلة 11.8 قانون فاراداي للحث إذا كانت نسبة مقادير المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي تساوي c .

قانون ماكسويل - أمبير

وأخيرًا، سنتناول قانون ماكسويل - أمبير. بالنسبة إلى الموجات الكهرومغناطيسية، حيث لا يتدفق أي تيار، يمكننا كتابة

$$(11.16) \quad \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

لتقييم التكامل في الطرف الأيسر من هذه المعادلة، نفترض وجود حلقة مغلقة في المستوى xz بعرض dx وارتفاع h ويمثلها المستطيل الرمادي في الشكل 11.8. تتجه المساحة التفاضلية لهذا المستطيل في اتجاه y الموجب.

يتم تحديد التكامل عبر الحلقة في الاتجاه المعاكس لعقارب الساعة (a إلى b إلى c إلى d إلى a) بالمعادلة

$$(11.17) \quad \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = Bh - (B + dB)(h) = -(dB)(h)$$

كما ذكرنا سابقًا، لا تسهم أجزاء الحلقة الموازية للمحور x في التكامل. يمكن كتابة الطرف الأيمن من المعادلة 11.16 بالصورة

$$(11.18) \quad \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \mu_0 \epsilon_0 A \frac{dE}{dt} = \mu_0 \epsilon_0 (h) (dx) \frac{dE}{dt}$$

حيث يمثل dt الزمن الذي تتحرك خلاله الموجة مسافة dx . بالتعويض من المعادلة 11.17 و 11.18 في المعادلة 11.16، نحصل على

$$-(dB)(h) = \mu_0 \epsilon_0 (h) (dx) \frac{dE}{dt}$$

بالتعبير عن هذه المعادلة بدلالة المشتقات الجزئية، كما فعلنا في المعادلة 11.12، نحصل على

$$-\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

والآن، باستخدام المعادلة 11.8، نحصل على

$$-[\kappa B_{\max} \cos(\kappa x - \omega t)] = -\mu_0 \epsilon_0 \omega E_{\max} \cos(\kappa x - \omega t)$$

أو

$$\frac{E_{\max}}{B_{\max}} = \frac{\kappa}{\mu_0 \epsilon_0 \omega} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 c}$$

يمكننا التعبير عن هذه المعادلة بدلالة مقادير المجالين الكهربائي والمغناطيسي كما فعلنا سابقًا:

$$(11.19) \quad \frac{E}{B} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 c}$$

تحقق المعادلة 11.8 قانون ماكسويل - أمبير إذا كانت النسبة بين مقادير المجالين الكهربائي والمغناطيسي تحدها النسبة $1/\mu_0 \epsilon_0 c$.

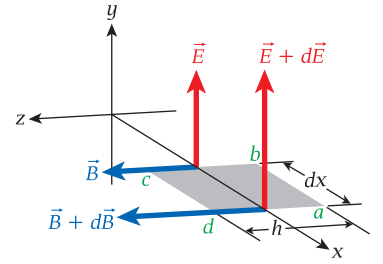
سرعة الضوء

من المعادلة 11.15 و 11.19، يمكننا استنتاج أنَّ

$$\frac{E}{B} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 c} = c$$

ما يؤدي إلى

$$(11.20) \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$



الشكل 11.8 تمثيلات المجالين الكهربائي والمغناطيسي في موجة كهرومغناطيسية عند لحظة معينة. تمثل المنطقة الرمادية حلقة تكامل لقانون ماكسويل - أمبير.

ومن ثم، يمكن التعبير عن الموجة الكهرومغناطيسية بدلالة ثابتين أساسيين مرتبطين بالمجالين الكهربائي والمغناطيسي؛ النفاذية المغناطيسية والسماحية الكهربائية في الفراغ. ينتج عن التعويض بالقيم المقبولة لهذين الثابتين في المعادلة 11.20 نحصل على

$$c = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})(8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m})}} = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

مراجعة المفاهيم 11.4

ما الوقت اللازم لانتقال ضوء الليزر من الأرض إلى القمر والعودة مرة أخرى؟ المسافة بين الأرض والقمر $3.84 \times 10^8 \text{ m}$

- a) 0.640 s d) 15.2 s
b) 1.28 s e) 85.0 s
c) 2.56 s

سؤال الاختبار الذاتي 11.1

الشعري هو أكثر النجوم لمعاناً في سماء الليل، ويقع على مسافة $8.30 \times 10^{16} \text{ m}$ من الأرض. عندما نرى الضوء من هذا النجم، كم مضى من الزمن (بالسنوات) على الضوء الذي نراه؟



تساوي هذه السرعة المحسوبة سرعة الضوء التي تم قياسها. يعني هذا التساوي أنَّ كل الموجات الكهرومغناطيسية تتحرك (في الفراغ) بسرعة الضوء، كما يشير إلى أنَّ الضوء موجة كهرومغناطيسية. تنص المعادلة 11.15 على أنَّ $E/B = c$. على الرغم من أنَّ c عدد كبير للغاية، فإنَّ المعادلة 11.15 لا تعني أنَّ مقدار المجال الكهربائي أكبر بكثير من مقدار المجال المغناطيسي. في الواقع، تُقاس المجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية بوحدة مختلفة، لذلك لا يمكن المقارنة بينها بشكل مباشر. تمثل سرعة الضوء عنصرًا مهمًا في نظرية النسبية الخاصة. تكون سرعة الضوء ثابتة في أي مناطق إسناد. ومن ثم، إذا أرسلت موجة كهرومغناطيسية في اتجاه معين، فإنَّ أي مراقب، بغض النظر عما إذا كان هذا المراقب يتحرك في اتجاهك أو بعيدًا عنك أو يتحرك في اتجاه آخر، فإنَّه سيرى هذه الموجة تتحرك بسرعة الضوء. تؤدي هذه النتيجة المذهلة بالإضافة إلى النتيجة المعقولة التي تنص على أنَّ قوانين الفيزياء ثابتة بالنسبة إلى كل المراقبين القصوريين إلى نظرية النسبية الخاصة. يمكن قياس سرعة الضوء بدقة شديدة، بدقة أكبر بكثير من تحديد المتر من خلال المعيار المرجعي الأصلي. ومن ثم، يمكن الآن تحديد سرعة الضوء بدقة كما يلي

$$(11.21) \quad c = 299,792,458 \text{ m/s}$$

يتم تعريف المتر الآن ببساطة بأنه المسافة التي يقطعها الضوء في الفراغ في فترة زمنية تبلغ $1/299,792,458 \text{ s}$.

11.3 الطيف الكهرومغناطيسي The Electromagnetic Spectrum

تنتقل جميع الموجات الكهرومغناطيسية بسرعة الضوء. على الرغم من ذلك، يتغير الطول الموجي والتردد للموجات الكهرومغناطيسية بدرجة كبيرة. ترتبط سرعة الضوء، c ، والطول الموجي، λ ، والتردد f بالمعادلة

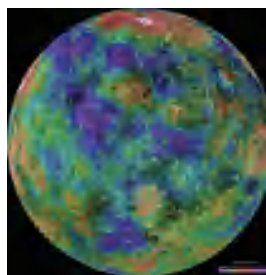
$$(11.22) \quad c = \lambda f$$

يمثل الضوء وموجات الراديو وموجات الميكروويف والأشعة السينية وأشعة جاما أمثلة للموجات الكهرومغناطيسية. يوضح الشكل 11.9 ثلاثة استخدامات للموجات الكهرومغناطيسية. يوضح الشكل 11.10 **الطيف الكهرومغناطيسي** الذي يتضمن موجات كهرومغناطيسية بطول موجي يتراوح بين 1000 m وأطول من ذلك إلى أقل من 10^{-12} m . مع الترددات المناظرة التي تتراوح بين 10^5 Hz و 10^{20} Hz . يتم تعريف الموجات الكهرومغناطيسية ذات الأطوال الموجية (والترددات) في نطاقات معينة بأسماء خاصة:

- **يشير الضوء المرئي** إلى الموجات الكهرومغناطيسية التي يمكن أن نراها بأعيننا، وتتراوح أطوالها الموجية بين 400 nm (أزرق) و 700 nm (أحمر). تصل ذروة استجابة العين البشرية إلى 550 nm تقريبًا (أخضر) وتنخفض سريعًا بالابتعاد عن هذا الطول الموجي. أمَّا الأطوال



(a)

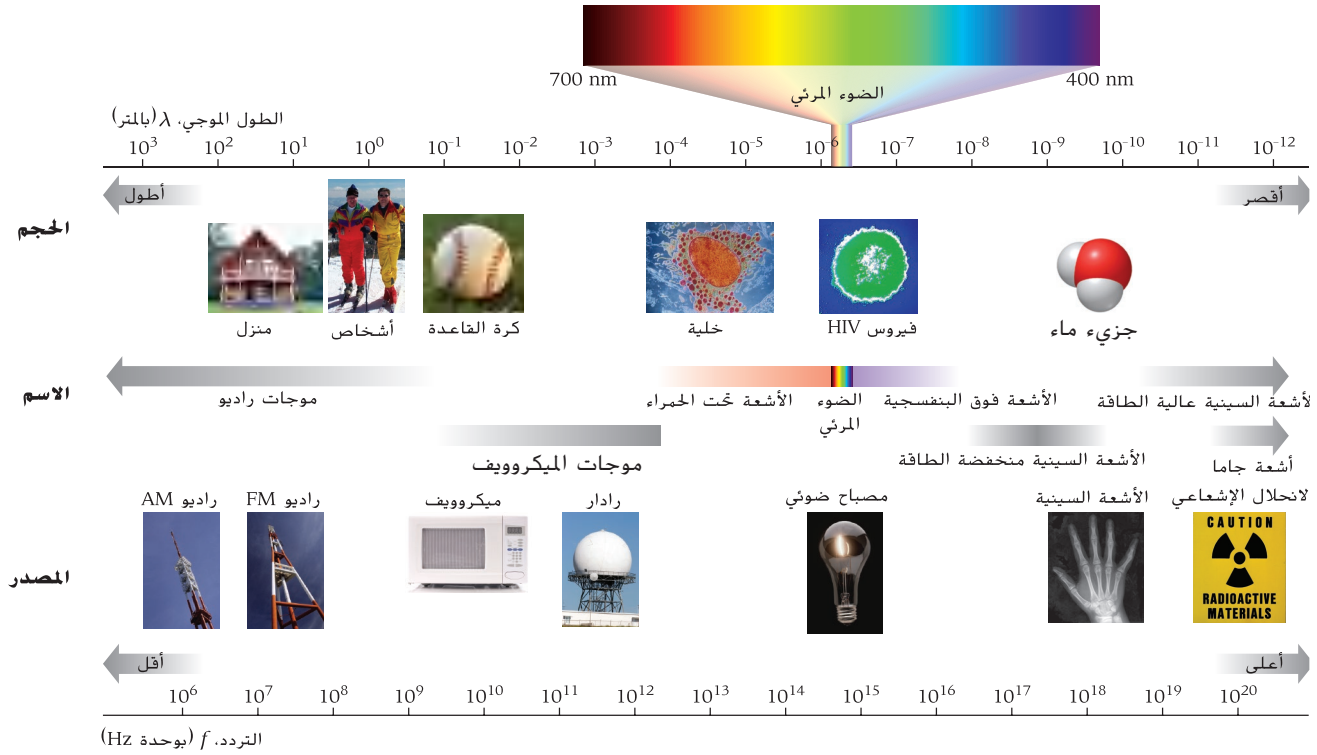


(b)



(c)

الشكل 11.9 (a) تلسكوب راديوي في مصفوف المراصد العظيم. (b) صورة زائفة اللون لسطح كوكب الزهرة ملتقطة بواسطة رادار. (c) صورة ليد بالأشعة السينية.



الشكل 11.10 الطيف الكهرومغناطيسي.

- الموجبة الأخرى للموجات الكهرومغناطيسية فلا يمكن للعين البشرية أن تراها. لكن يمكننا اكتشافها بوسائل أخرى.
- **ينتج عن الأشعة تحت الحمراء** التي تصل أطوالها الموجية الأطول قليلاً من الضوء المرئي إلى ما يقرب من 10^{-4} m إحساس بالحرارة. يمكن استخدام كاشفات موجات الأشعة تحت الحمراء لقياس التسرب الحراري في المنازل والمكاتب بالإضافة إلى تحديد مواقع الراكبين الخاملة. يتمكن العديد من الحيوانات من رؤية موجات الأشعة تحت الحمراء. ولذلك يمكن أن ترى في الظلام. يمكن استخدام الأشعة تحت الحمراء أيضًا في الصنابير الأوتوماتيكية في دورات المياه العامة ووحدات أجهزة التحكم عن بُعد للتلفزيون ومُشغلات أقراص DVD.
 - **يمكن أن تتسبب الأشعة فوق البنفسجية** التي تكون أطوالها الموجية أقصر قليلاً من الضوء المرئي ببضعة نانومترات (10^{-9} m) في حدوث أضرار في الجلد وحروق الشمس. لحسن الحظ، يمنع الغلاف الجوي وخاصة طبقة الأوزون معظم أشعة الشمس فوق البنفسجية من الوصول إلى سطح الأرض. تُستخدم الأشعة فوق البنفسجية في المستشفيات لتعقيم الأدوات والانبعاث المثار للإشعاع إما يعرف الفلورية.
 - **موجات الراديو** لها ترددات تتراوح بين عدة مئات kHz (راديو AM) و 100 MHz (راديو FM). كما تُستخدم على نطاق واسع في علم الفلك لأنها يمكنها المرور عبر سُحب الغبار والغاز التي تحجب الضوء المرئي؛ مصفوف المراسد العظيم الموضح في الشكل 11.9a عبارة عن مجموعة من التلسكوبات التي تستخدم موجات الراديو.
 - **موجات الميكروويف**، التي تُستخدم لإعداد الفشار في فرن الميكروويف وإرسال الرسائل الهاتفية من خلال أبراج التقوية أو الأقمار الصناعية، تبلغ ترددات 10 GHz تقريبًا. يستخدم الرادار موجات ذات أطوال موجية تتراوح بين موجات الراديو والموجات متناهية الصغر، ما يَكُنُّها من الانتقال بسهولة عبر الغلاف الجوي والانعكاس على الأجسام التي تتراوح أحجامها بين حجم كرة البيسبول وسحابة. يوضح الشكل 11.9b صورة بالرادار لسطح كوكب الزهرة المحجوبة بالسُّحب دائمًا التي تحجب الضوء المرئي.
 - **الأشعة السينية** المستخدمة للحصول على صور طبية، كذلك الموضحة في الشكل 11.9c، لها أطوال موجية في حدود 10^{-10} m. يساوي هذا الطول المسافة ذاتها تقريبًا التي تكون بين الذرات في بلورة صلبة. ولذلك تُستخدم الأشعة السينية لتحديد البنية الجزيئية المفصلة لأي مادة يمكن أن تكون متبلرة.

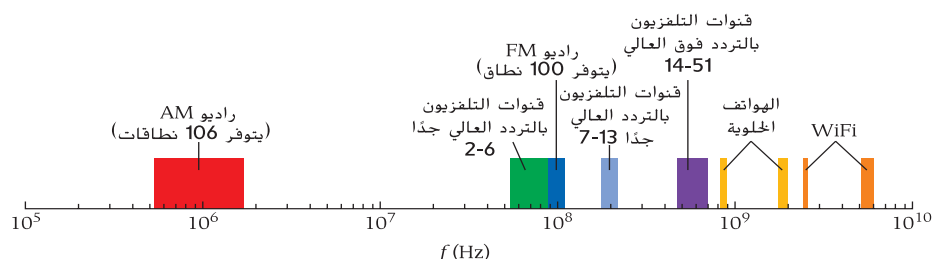
سؤال الاختبار الذاتي 11.2

تُبث محطة إذاعية FM على تردد 90.5 MHz، وتُبث محطة إذاعية AM على تردد 870 kHz. ما الأطوال الموجية لهذه الموجات الكهرومغناطيسية؟

■ **أشعة جاما** المنبعثة في الانحلال الإشعاعي للنواة لها أطوال موجية قصيرة للغاية في حدود 10^{-12} m ويمكن أن تدمر الخلايا الحية. غالبًا ما تُستخدم في الطب لتدمير الخلايا السرطانية أو أي أنسجة خبيثة يصعب الوصول إليها.

نطاقات تردد البث الإذاعي والتلفازي والاتصالات

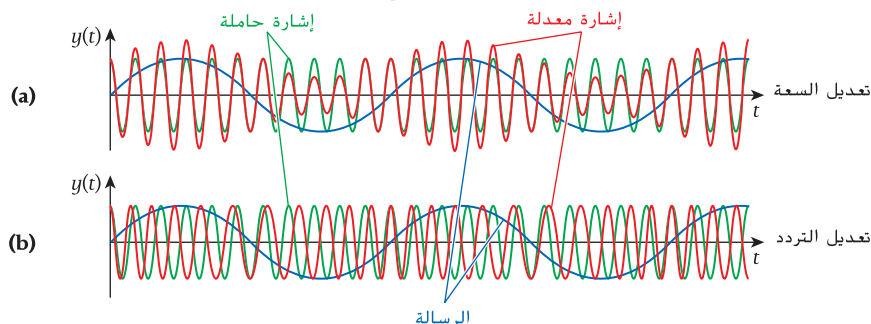
يوضح الشكل 11.11 نطاقات التردد المخصصة للبث الإذاعي والتلفزيوني. يتراوح نطاق الترددات المخصصة لمحطات راديو AM (تعديل السعة) بين 535 kHz و 1705 kHz. تستخدم محطات راديو FM (تعديل التردد) ترددات تتراوح بين 88.0 MHz و 108.0 MHz. يعمل التردد العالي جدًا (VHF) للتلفزيون في نطاقين: من 54.0 MHz إلى 88.0 MHz للقنوات من 2 إلى 6، ومن 174.0 MHz إلى 216.0 MHz للقنوات من 7 إلى 13. تبث قنوات التلفزيون من 14 إلى 51 ذات التردد فوق العالي (UHF) في نطاق يتراوح بين 470.0 MHz و 698.0 MHz. تبث معظم أجهزة التلفزيون عالي الوضوح (HDTV) باستخدام نطاق التردد فوق العالي (UHF) والقنوات من 14 حتى 51.



الشكل 11.11 النطاقات الترددية المخصصة للبث الإذاعي، والبث التلفزيوني، والهواتف الخلوية، واتصالات الكمبيوتر اللاسلكية (WiFi) في الولايات المتحدة.

ترسل محطة الراديو أو التلفزيون إشارة حاملة على تردد معين. الإشارة الحاملة عبارة عن موجة جيبية بتردد يساوي تردد محطة الإذاعة. بالنسبة إلى بث راديو AM، يتم تعديل سعة الموجة الحاملة حسب المعلومات التي يتم نقلها. كما هو موضح في الشكل 11.12a، يحمل تعديل سعة الإشارة الحاملة الرسالة المنقولة. يوضح الشكل 11.12a موجة جيبية بسيطة تشير إلى نقل نغمة بسيطة. يتم استقبال الإشارة من خلال دائرة محث ومكثف ومقاوم (RLC) معدلة يساوي ترددها الرنيني تردد الإشارة الحاملة. يتناسب التيار المستحث في الدائرة الكهربائية مع الرسالة الجارية نقلها. يمكن أن يتعرض بث AM للتشويش وفقدان الإشارة لأن الرسالة تتناسب مع سعة الإشارة التي يمكن أن تتغير باختلاف الظروف.

بالنسبة إلى بث FM، يتم تعديل تردد الإشارة الحاملة حسب الرسالة لإنتاج إشارة معدلة. كما هو موضح في الشكل 11.12b، يتأثر هذا النوع من البث بالتشويش وفقدان الإشارة بدرجة أقل بكثير لأنه يتم استخلاص الرسالة من تغيرات تردد الإشارة الحاملة بدلاً من التغيرات في سعة الإشارة الحاملة. تستخدم مستقبلات راديو FM مميز فوستر - سيلبي لفك تعديل إشارة FM. يكون مميز فوستر - سيلبي، الذي يستخدم دائرة محث ومكثف ومقاوم (RLC) مضبوطة على تردد الإشارة الحاملة ومتصلة بصمامين ثنائيين، مشابهًا لمقوم الموجة الكاملة الذي تناولناه سابقًا. إذا كانت المدخلات تساوي تردد الموجة الحاملة، فإن كلا نصفي الدائرة الموالفة ينتجان الجهد الكهربائي المعدل نفسه ويكون الخرج صفرًا. كلما تغير تردد الإشارة الحاملة، تغير التوازن بين نصفي الدائرة المعدلة، ما ينتج عنه جهد كهربائي



الشكل 11.12 (a) تعديل السعة. (b) تعديل التردد. في الحالتين، يمثل المنحنى الأخضر الإشارة الناقلة، ويمثل المنحنى الأحمر الإشارة المعدلة، ويشير المنحنى الأزرق إلى المعلومات التي يتم إرسالها.

يتناسب مع انحراف تردد الإشارة الحاملة. يكون ميمز فوستر - سيلي حساسًا لتغيرات السعة وعادةً ما يكون مقترنًا بمرحلة مضخم حدي لإزالة حساسيته للتغيرات في شدة الموجة الحاملة عن طريق السماح بمرور الإشارات الأقل قدرة من خلاله دون أن تتأثر أثناء إزالة النسب المرتفعة للإشارات التي تتجاوز مستوى قدرة معينًا.

تثبت أجهزة إرسال التلفزيون عالي الوضوح المعلومات رقميًا في شكل أعداد متكررة من الصفر والواحد. يشتمل بايت واحد من المعلومات على ثماني وحدات بت، حيث يكون البت صفرًا أو واحدًا. تنقسم الشاشة بشكل فرعي إلى عناصر صورة (بكسل) مع تمثيلات رقمية باللون الأحمر والأخضر والأزرق لكل بكسل. تبلغ أعلى دقة حاليًا لأجهزة التلفزيون عالية الوضوح 1080i، التي تشتمل على 1920 بكسل في الاتجاه الأفقي و1080 بكسل في الاتجاه الرأسي. يتم تحديث نصف الصورة (خط أفقي من بين كل خطين) 60 مرة في الثانية، ويتداخل نصف الصورة لتشكيل صورة كاملة. (راجع القسم الفرعي "تطبيقات الاستقطاب" في القسم 11.6 للحصول على مزيد من المعلومات حول تنسيقات الفيديو). يذيع التلفزيون عالي الوضوح باستخدام تقنية الضغط - فك الضغط (الترميز/فك الترميز)، وهي ما تعرف عادةً بالمعيار MPEG-2 لتقليل كمية البيانات التي يجب نقلها. تنقل محطات التلفزيون عالي الوضوح النمذجية ما يقرب من 17 ميجابايت من المعلومات كل ثانية.

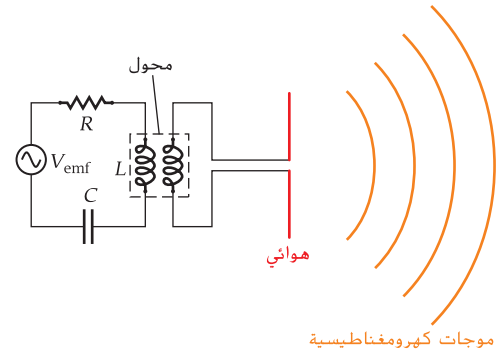
يقع إرسال الهواتف الخلوية في نطاقات ترددات تتراوح بين 824 و894 MHz وبين 1.85 و1.99 GHz. تقع اتصالات بيانات الشبكة اللاسلكية (WiFi) في نطاقات تتراوح بين 2.401 و2.484 GHz (بالنسبة إلى المعيار الدولي؛ يتضمن النطاق المعياري للولايات المتحدة الأمريكية حدًا أعلى يبلغ 2.473 GHz) وبين 5.15 و5.85 GHz. تقع هذه الترددات في نطاق موجة الميكروويف ويخشى بعض الأشخاص من نتائج التعرض لفترة طويلة للموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة من الهواتف الخلوية والشبكة اللاسلكية (WiFi). على الرغم من ذلك، تبرهن القدرة المنخفضة لهذه الأجهزة بالإضافة إلى حقيقة أنَّ طاقة هذه الموجات أقل بكثير من الموجات الأخرى التي تواجهها عادةً مثل الضوء المرئي على أنَّ مثل هذا التعرض لا يشكل خطرًا كبيرًا. ستناقش الوحدة المتعلقة بميكانيكا الكم طاقة الفوتونات المرتبطة بالموجات الكهرومغناطيسية.

الموجات الكهرومغناطيسية المتحركة

تنتج العمليات دون الذرية موجات كهرومغناطيسية مثل أشعة جاما والأشعة السينية والضوء. يمكن أن تنتج الموجات الكهرومغناطيسية أيضًا من دائرة الحث والمكثف والمقاوم (RLC) المتصلة بهوائي (الشكل 11.13). تتصل دائرة الحث والمكثف والمقاوم (RLC) بالهوائي عبر محوّل. يُستخدم الهوائي ثنائي القطب للتقريب بين القطب الثنائي الكهربائي. يتغير الجهد الكهربائي في الهوائي جيبيًا بتغير الزمن ويسبب تذبذب الشحنة المتدفقة في الهوائي بتردد ω_0 ، الخاص بدائرة الحث والمكثف والمقاوم (RLC). تنتج الشحنات المتسارعة موجات كهرومغناطيسية متحركة. تتحرك هذه الموجات من الهوائي بسرعة C وتردد $f = \omega_0 / (2\pi)$.

تنتشر الموجات الكهرومغناطيسية المتحركة من خلال انتشار مقدمة الموجة على شكل كروي من الهوائي. على الرغم من ذلك، تظهر مقدمة الموجة بشكل مسطح أو مستوي تقريبًا على مسافة بعيدة من الهوائي. ومن ثم، يتم توضيح مثل هذه الموجة المتحركة بالمعادلة 11.8. إذا وضعت دائرة حث ومكثف ومقاوم (RLC) ثانية مضبوطة على التردد نفسه، ω_0 ، مثل الدائرة الباعثة، في مسار هذه الموجات الكهرومغناطيسية، فسيُنتج جهد كهربائي وتيار في هذه الدائرة الثانية. هذه الذبذبات المستحثة هي أساس الإرسال والاستقبال الإذاعي. إذا كانت الدائرة الثانية لها تردد $\omega = 1/\sqrt{LC}$ مختلف عن ω_0 ، فستنتج قيم جهد كهربائي وقيم تيار أصغر بكثير. لا تنتج إشارة في دائرة الاستقبال إلا إذا كان تردد الرنين لدائرة الاستقبال هو التردد المرسل نفسه أو كان قريبًا جدًا منه. ومن ثم، يمكن للجهاز المستقبل تحديد إرسال بتردد معين ورفض جميع أنواع الإرسال الأخرى.

اكتشف هاينريش هرتز مبادئ إرسال الموجات الكهرومغناطيسية في عام 1888. كما ذكرنا في القسم 11.1، واستخدمها الفيزيائي الإيطالي غوليلمو ماركوني (1874-1937) لنقل الإشارات اللاسلكية.



الشكل 11.13 دائرة حث ومكثف ومقاوم (RLC) مقترنة بهوائي تنبعث منه موجات كهرومغناطيسية متحركة.



11.4 متجه بوينتنج ونقل الطاقة

Poynting Vector and Energy Transport

عندما تسير في ضوء الشمس، تشعر بالدفء. لكن إذا بقيت لفترة طويلة تحت أشعة الشمس الساطعة، فستصاب بحروق الشمس. تنتج هذه الظواهر بسبب الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة من الشمس. تحمل هذه الموجات الكهرومغناطيسية الطاقة التي تنتج من التفاعلات النووية في مركز الشمس. عادةً ما يتم تحديد معدل نقل الطاقة بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية بدلالة المتجه، \vec{S} ويتم الحصول عليه بالمعادلة

$$(11.23) \quad \vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

تسمى هذه الكمية **متجه بوينتنج**، نسبة إلى الفيزيائي البريطاني جون بوينتنج (1852-1914) الذي يُعد أول من ناقش خصائصها. يرتبط مقدار \vec{S} بالمعدل اللحظي لنقل الطاقة عن طريق الموجات الكهرومغناطيسية في مساحة معينة، أو ببساطة أكثر القدرة اللحظية لكل وحدة مساحة:

$$(11.24) \quad S = |\vec{S}| = \left(\frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}} \right)_{\text{اللحظية}}$$

ومن ثم، تقدر وحدات متجه بوينتنج بالوات لكل متر مربع (W/m^2). \vec{S} على \vec{E} حيث يتعامد \vec{B} فإنَّ المعادلة 11.23 تنتج

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB$$

وفقًا للمعادلة 11.15، يرتبط مقدارا المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي بالعلاقة $E/B = c$. ومن ثم، يمكننا التعبير عن القدرة اللحظية لكل وحدة مساحة للموجة بدلالة مقدار المجال الكهربائي أو المجال المغناطيسي. بما أنَّ قياس المجال الكهربائي يكون أسهل عادةً من قياس المجال المغناطيسي، يتم تحديد القدرة اللحظية لكل وحدة مساحة بالمعادلة

$$(11.25) \quad S = \frac{1}{c\mu_0} E^2$$

يمكننا الآن التعويض بصيغة جيبية عن المجال الكهربائي، $E = E_{\max} \sin(\kappa x - \omega t)$ ، ونحصل على تعبير للقدرة المتوسطة لكل وحدة مساحة. على الرغم من ذلك، تكون الشدة، I ، هي الوسيلة المعتادة لوصف القدرة لكل وحدة مساحة للموجة الكهرومغناطيسية، ويتم الحصول عليها بالمعادلة

$$I = S_{\text{ave}} = \left(\frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}} \right)_{\text{ave}} = \frac{1}{c\mu_0} \left[E_{\max}^2 \sin^2(\kappa x - \omega t) \right]_{\text{ave}}$$

وحدات الشدة هي الوحدات نفسها لمتجه بوينتنج، W/m^2 . القيمة المتوسطة عبر الزمن لـ $\sin^2(\kappa x - \omega t)$ تساوي $\frac{1}{2}$ ، ولذلك يمكننا التعبير عن الشدة بالصورة

$$(11.26) \quad I = \frac{1}{c\mu_0} E_{\text{rms}}^2$$

$$E_{\text{rms}} = E_{\max} / \sqrt{2}$$

نظرًا لارتباط مقداري المجالين الكهربائي والمغناطيسي للموجة الكهرومغناطيسية بالعلاقة $E = cB$ عبارة عن رقم كبير جدًا، يمكنك استنتاج أنَّ الطاقة التي ينقلها المجال الكهربائي أكبر بكثير من التي ينقلها المجال المغناطيسي. تكون هذه الطاقات في الواقع متساوية. لمعرفة هذا، تذكر ما تعلمناه في الوحدة 4 و9 بأنه يتم تحديد كثافة الطاقة للمجال الكهربائي بالمعادلة

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

ويتم تحديد كثافة الطاقة للمجال المغناطيسي بالمعادلة

$$u_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

إذا عوضنا بـ $E = cB$ و $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ في التعبير الخاص بكثافة الطاقة للمجال الكهربائي، نحصل على

$$(11.27) \quad u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 (cB)^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left(\frac{B}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \right)^2 = \frac{1}{2\mu_0} B^2 = u_B$$

ومن ثم، تساوي كثافة الطاقة للمجال الكهربائي كثافة الطاقة للمجال المغناطيسي في كل جزء من الموجة الكهرومغناطيسية.

مثال 11.1

استخدام الألواح الشمسية لشحن سيارة كهربائية

افترض أنه يمكن تركيب ألواح شمسية كهروضوئية (تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية) (الشكل 11.14a) على سطح منزلك بالتكلفة $\eta = \text{AED } 1430/\text{m}^2$. لديك سيارة كهربائية. (الشكل 11.14b) تتطلب شحنًا يعادل طاقة $U = 10.0 \text{ kWh}$ ليوم واحد من القيادة داخل المدينة. تحول الألواح الشمسية الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية بفعالية $\epsilon = 45\%$ ومساحة A . افترض أن ضوء الشمس يسقط على الألواح الشمسية بزم $\Delta t = 4.00 \text{ h}$ في اليوم بمتوسط شدة مقدارها $S_{\text{ave}} = 600 \text{ W/m}^2$.

المسألة

ما تكلفة ما ستنتفقه على الألواح الشمسية لشحن سيارتك الكهربائية يوميًا؟

الحل

تساوي بين الكمية الكلية للطاقة التي تنتجها الألواح الشمسية والطاقة المطلوبة لشحن السيارة:

$$U_{\text{produced}} = P \Delta t = U$$

تساوي كمية الطاقة الناتجة عن الألواح الشمسية بمتوسط شدة ضوء الشمس مضروبًا في مساحة الألواح الشمسية مضروبًا في فعالية الألواح الشمسية:

$$P = \epsilon S_{\text{ave}} A$$

ومن ثم، تكون المساحة الإجمالية المطلوبة

$$A = \frac{P}{\epsilon S_{\text{ave}}} = \frac{(U/\Delta t)}{\epsilon S_{\text{ave}}} = \frac{U}{\epsilon S_{\text{ave}} \Delta t}$$

إذا ستكون التكلفة الإجمالية

$$\text{التكلفة} = \eta A = \frac{\eta U}{\epsilon S_{\text{ave}} \Delta t}$$

بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$\text{التكلفة} = \frac{\eta U}{\epsilon S_{\text{ave}} \Delta t} = \frac{(1430/\text{m}^2)(10.0 \text{ kWh})}{(0.45)(0.600 \text{ kW/m}^2)(4.00 \text{ h})} = \text{AED } 13240$$

إذا كنت تقود سيارتك الكهربائية بمعدل $59.2 \text{ كيلومترًا يوميًا}$ لمدة 10 سنوات، فستصل تكلفة ذلك إلى 6.0 فلسًا لكل كيلومتر. ستكون التكلفة 14 فلسًا لكل كيلومتر بالنسبة إلى السيارة التي تعمل بالجازولين بمعدل 8.5 km/l وتكلفة الجازولين تبلغ $\text{AED } 2.00$ لكل لتر.

لا يُعد هذا توفيرًا كبيرًا للتكاليف على مدى 10 سنوات ($\text{AED } 13240$) بالنسبة إلى السيارة التي تعمل بالطاقة الشمسية مقابل $\text{AED } 50842$ للسيارة التي تعمل بالجازولين) باعتبار أن تكلفة السيارة الكهربائية يمكن أن تكون أكبر من السيارة التي تعمل بالبنزين. على الرغم من ذلك، ستكون سيارتك التي تعمل بالطاقة الشمسية وسيلة نقل صديقة للبيئة تمامًا وخالية تمامًا من الانبعاثات (مثل ركوب دراجتك من دون فوائد التمرين). يعمل علماء المواد بشكل مكثف لزيادة كفاءة الخلايا الشمسية المتاحة تجاريًا، كما أدى الإنتاج الضخم إلى خفض تكلفة الألواح الشمسية بشكل كبير في السنوات الأخيرة ومن المتوقع أن يستمر ذلك في المستقبل. لذلك يمكن أن تصبح السيارات الكهربائية التي تعمل بالطاقة الشمسية قريبًا بديلًا صالحًا وجذابًا للسيارات التي تعمل بالجازولين.



(a)



(b)

الشكل 11.14 (a) ألواح شمسية كهروضوئية مركبة على سطح منزل. (b) سيارة كهربائية يصل مدى القيادة لها إلى مسافة 37 ميلًا بشحنة واحدة.

القيم الفعالة (rms) للمجالين الكهربائي والمغناطيسي

المثال 11.2

الناجمين من ضوء الشمس

يبلغ متوسط شدة ضوء الشمس على سطح الأرض 1400 W/m^2 تقريبًا، إذا كانت الشمس متعامدة.

المسألة

ما القيم الفعالة للمجالين الكهربائي والمغناطيسي لهذه الموجات الكهرومغناطيسية؟

الحل

يمكن ربط شدة ضوء الشمس بالقيمة الفعالة للمجال الكهربائي باستخدام المعادلة 11.26:

$$I = \frac{1}{c\mu_0} E_{\text{rms}}^2$$

من خلال حل المعادلة لإيجاد قيمة القيمة الفعالة للمجال الكهربائي، نحصل على

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{Ic\mu_0} = \sqrt{(1400 \text{ W/m}^2)(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A})}$$

$$= 730 \text{ V/m}$$

وعند المقارنة نجد أنَّ القيمة الفعالة للمجال الكهربائي في المنزل العادي يبلغ $5\text{--}10 \text{ V/m}$. عند الوقوف تحت خط نقل الطاقة الكهربائية مباشرة، يمكن أن نشعر القيمة الفعالة للمجال الكهربائي بمقدار $200\text{--}10,000 \text{ V/m}$ حسب الأحوال.

تكون القيمة الفعالة للمجال المغناطيسي لضوء الشمس كما يلي

$$B_{\text{rms}} = \frac{E_{\text{rms}}}{c} = \frac{730 \text{ V/m}}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2.4 \text{ } \mu\text{T}$$

وعند المقارنة نجد أنَّ القيمة الفعالة للمجال المغناطيسي للأرض تساوي $50 \text{ } \mu\text{T}$. القيمة الفعالة للمجال المغناطيسي في المنزل العادي $0.5 \text{ } \mu\text{T}$ ، والقيمة الفعالة للمجال المغناطيسي تحت خط نقل الطاقة $2 \text{ } \mu\text{T}$.

Radiation Pressure

ضغط الإشعاع

11.5

عندما تسير في ضوء الشمس، تشعر بالدفء، ولكن لا تشعر بأي قوة من أشعة الشمس. يبذل ضوء الشمس ضغطًا عليك، ولكن هذا الضغط ضئيل جدًا لدرجة لا يمكنك الإحساس بها. نظرًا لأنَّ الموجات الكهرومغناطيسية التي تشكل ضوء الشمس تشع من الشمس وتنتقل إلى الأرض، فإنَّه يشار إليها **بالإشعاع**. في علم الفيزياء النووية، هذا النوع من الإشعاع لا يضاهي بالضرورة الإشعاعات الناتجة عن النشاط الإشعاعي لانحلال الأنوية غير المستقرة. على الرغم من ذلك، فإنَّ موجات الراديو وتحت الحمراء والضوء المرئي والأشعة السينية جميعها عبارة عن الإشعاع الكهرومغناطيسي نفسه بشكل أساسي. (ولكن هذا لا يعني أنَّ جميع أنواع الإشعاع الكهرومغناطيسي لها التأثير ذاته على جسم الإنسان. على سبيل المثال، يمكن أن تسبب الأشعة فوق البنفسجية الإصابة بحروق الشمس وحتى الإصابة بسرطان الجلد، بينما لا يوجد دليل موثوق على أنَّ الإشعاع المنبعث من الهواتف الخلوية يمكن أن يسبب السرطان). لنحسب مقدار الضغط الذي تؤثره هذه الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة. تحمل الموجات الكهرومغناطيسية الطاقة، U ، كما هو موضح في القسم 11.4. يكون للموجات الكهرومغناطيسية كمية حركة خطية، \vec{p} ، يُعد هذا المفهوم غامضًا لأنَّ الموجات الكهرومغناطيسية ليست لها أي كتلة، وقد عرفنا أنَّ كمية الحركة تساوي الكتلة مضروبة في السرعة المتجهة. أثبت ماكسويل أنَّه إذا تمَّ امتصاص موجة مستوية من الإشعاع بالكامل بواسطة سطح ما (متعامد على اتجاه الموجة المستوية) لفترة زمنية، Δt ، وتمَّ امتصاص مقدار من الطاقة، ΔU ، بواسطة السطح في هذه العملية، إذاً يكون مقدار كمية الحركة التي تنقلها الموجه إلى هذا السطح في هذه الفترة الزمنية كما يلي

$$\Delta p = \frac{\Delta U}{c}$$

تشير النسبة أنَّ العلاقة بين الطاقة وكمية الحركة تنطبق على الأجسام عدمة الكتلة؛ أمَّا الآن، فهي مذكورة بوصفها حقيقة من دون دليل.

إذاً مقدار القوة على السطح $F = \Delta p / \Delta t$ (قانون نيوتن الثاني). قيمة الطاقة الكلية، ΔU ، التي تمتصتها المساحة A للسطح خلال فترة زمنية Δt تساوي ناتج ضرب المساحة في الفترة الزمنية في شدة الإشعاع، I (سبق شرحه في القسم 11.4): $U = I A \Delta t$. ومن ثَمَّ، مقدار القوة التي تبذلها الموجة الكهرومغناطيسية على هذه المساحة يساوي

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\Delta U}{c \Delta t} = \frac{I A \Delta t}{c \Delta t} = \frac{I A}{c}$$

بما أنَّ الضغط هو القوة (من حيث المقدار) لكل وحدة مساحة، يكون ضغط الإشعاع، p_r ، كما يلي

$$p_r = \frac{F}{A}$$

ومن ثَمَّ،

$$p_r = \frac{I}{c} \quad (\text{للامتصاص الكامل}) \quad (11.28)$$

تنص المعادلة 11.28 على أنَّ ضغط الإشعاع الناتج عن الموجات الكهرومغناطيسية يساوي ببساطة الشدة مقسومة على سرعة الضوء، ولكن ينطبق هذا فقط في حال الامتصاص السطح للإشعاع بشكل كامل.

تمثل الحالات الأخرى في الانعكاس الكامل للموجات الكهرومغناطيسية. في هذه الحالة، يكون نقل كمية الحركة ضعف المقدار بالنسبة إلى الامتصاص الكامل، كما هو الحال عندما يكون مقدار كمية الحركة المنقول من الكرة إلى الجدار في التصادم المرِن تمامًا ضعف المقدار المنقول في التصادم غير المرِن تمامًا. في التصادم المرِن تمامًا، تنعكس كمية الحركة الابتدائية للكرة ويكون $\Delta p = p_i - (-p_i) = 2p_i$. أمَّا بالنسبة إلى التصادم غير المرِن تمامًا، فيكون $p_i = 0 = \Delta p = p_i$. ومن ثَمَّ، يكون ضغط الإشعاع في حالة الانعكاس الكامل للموجات الكهرومغناطيسية من السطح كما يلي

$$p_r = \frac{2I}{c} \quad (\text{لانعكاس الكامل}) \quad (11.29)$$

يكون ضغط الإشعاع الصادر من الشمس ضئيل نسبيًا. تبلغ شدة ضوء الشمس على سطح الأرض 1400 W/m^2 على الأكثر، عندما تكون الشمس عمودية تمامًا ولا يوجد أي سحب في السماء. (يمكن أن يحدث هذا بين مدار السرطان ومدار الجدي فقط، وهما يقعان على خط عرض $\pm 23^\circ$ بالنسبة إلى خط الاستواء). ومن ثَمَّ، فإنَّ أقصى ضغط إشعاع لضوء الشمس يتم امتصاصه بالكامل يساوي

$$p_r = \frac{I}{c} = \frac{1400 \text{ W/m}^2}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 4.67 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2 = 4.67 \text{ } \mu\text{Pa}.$$

بغرض المقارنة، نجد أنَّ ضغط الغلاف الجوي يساوي 101 kPa . وهذا أكبر من ضغط إشعاع ضوء الشمس على سطح الأرض بمعامل يزيد على 20 مليارًا. ثمة مقارنة أخرى مفيدة في أقل فرق ضغط يمكن لحاسة السمع البشرية أن تكتشفه، والذي يُشار إليه عمومًا بأنه $20 \text{ } \mu\text{Pa}$ تقريبًا للأصوات في نطاق تردد يبلغ 1 kHz . حيث تكون الأذن البشرية أكثر حساسية.

مثال 11.3 ضغط الإشعاع من مؤشر ليزر

مؤشر ليزر أخضر اللون بقدرة 1.00 mW . قمت بتركيز إضاءة مؤشر الليزر بشكل عمودي على مرآة وعكست الضوء. يبلغ قطر بقعة الضوء على المرآة 2.00 mm .

المسألة

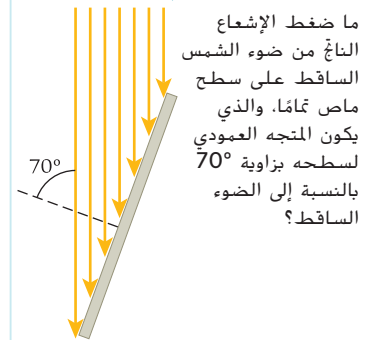
ما مقدار القوة التي يبذلها الضوء الصادر من مؤشر الليزر على المرآة؟

الحل

يتم تحديد شدة الضوء بالمعادلة

$$I = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}} = \frac{1.00 \times 10^{-3} \text{ W}}{\pi (1.00 \times 10^{-3} \text{ m})^2} = 318 \text{ W/m}^2$$

مراجعة المفاهيم 11.5



- a) $(4.67 \text{ } \mu\text{Pa})(\cos 70^\circ)$
- b) $(4.67 \text{ } \mu\text{Pa})(\sin 70^\circ)$
- c) $(4.67 \text{ } \mu\text{Pa})(\tan 70^\circ)$
- d) $(4.67 \text{ } \mu\text{Pa})(\cot 70^\circ)$

مراجعة المفاهيم 11.6

ما الحد الأقصى لضغط الإشعاع الناتج من ضوء الشمس الساقط على سطح عاكس تمامًا؟

- a) 0
- b) $2.34 \text{ } \mu\text{Pa}$
- c) $4.67 \text{ } \mu\text{Pa}$
- d) $9.34 \text{ } \mu\text{Pa}$

ويتم تحديد ضغط الإشعاع على سطح عاكس تمامًا من المعادلة 11.29 وهو يساوي أيضًا القوة التي يبذلها الضوء مقسومة على المساحة التي تؤثر فيها:

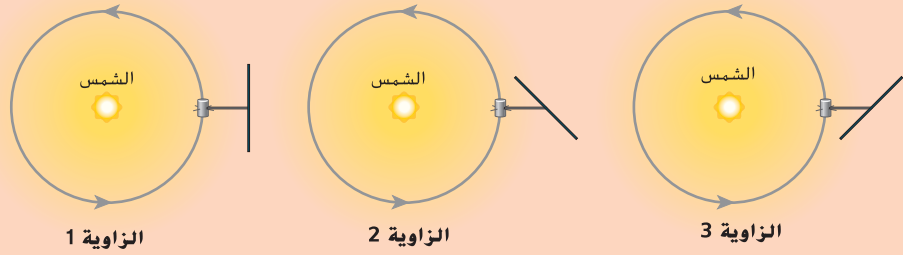
$$p_r = \frac{\text{القوة}}{\text{المساحة}} = \frac{2I}{c}$$

ومن ثم، فإن القوة المبذولة على المرآة تساوي

$$\text{القوة} = (\text{المساحة}) \left(\frac{2I}{c} \right) = \pi (1.0 \times 10^{-3} \text{ m})^2 \frac{2(318 \text{ W/m}^2)}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}} = 6.66 \times 10^{-12} \text{ N}$$

سؤال الاختبار الذاتي 11.3

افترض أن لديك قمرًا صناعيًا في مدار حول الشمس، كما هو موضح في الشكل. المدار في عكس اتجاه عقارب الساعة ويقابل القطب الشمالي للشمس. وتريد نشر شراع شمسي يتكون من مرآة كبيرة عاكسة تمامًا. يمكن توجيهها بحيث تكون متعامدة على الضوء القادم من الشمس أو بزاوية بالنسبة للضوء القادم من الشمس. صف تأثير المرآة في الأوضاع الثلاثة على مدار القمر الصناعي الخاص بك.



الأقمار الصناعية الشمسية الثابتة

مسألة محلولة 11.1

افترض أنَّ الباحثين يريدون وضع قمر صناعي ليظل ثابتًا فوق القطب الشمالي للشمس لدراسة خصائص دوران الشمس على المدى البعيد. سيتضمن القمر الصناعي شراعًا شمسيًا عاكسًا تمامًا وسيتم وضعه على مسافة $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ من مركز الشمس. تبلغ شدة ضوء الشمس عند هذه المسافة 1400 W/m^2 . يتعامد مستوى الشراع الشمسي على خط يصل بين القمر الصناعي ومركز الشمس. تبلغ كتلة القمر الصناعي والشراع 100.0 kg .

المسألة

ما المساحة المطلوبة للشراع الشمسي؟

الحل

فكر عند موضع اتزان القمر الصناعي، تكون القوة الناتجة تساوي ضرب مساحة الشراع الشمسي في ضغط الإشعاع الصادر عن الشمس قوة متوازنة مع قوة الجاذبية بين القمر الصناعي والشمس. يمكننا أن نساوي بين هاتين القوتين ونحل المعادلة لإيجاد مساحة الشراع الشمسي.

ارسم الشكل 11.15 عبارة عن رسم تخطيطي للقمر الصناعي والشراع الشمسي بالقرب من الشمس.

ابحث سيكون القمر الصناعي ثابتًا إذا كانت قوة الجاذبية، F_g ، متوازنة مع القوة الناتجة عن ضغط إشعاع ضوء الشمس، F_{rp} :

$$F_g = F_{rp}$$

القوة المناظرة لضغط الإشعاع من ضوء الشمس تساوي ضغط الإشعاع، p_r ، مضروبًا في مساحة الشراع الشمسي، A :

$$F_{rp} = p_r A$$

يمكن التعبير عن ضغط الإشعاع بدلالة شدة ضوء الشمس، I ، الساقط على الشراع الشمسي العاكس تمامًا:

$$p_r = \frac{2I}{c}$$

يتم تحديد قوة الجاذبية بين القمر الصناعي والشمس من المعادلة

$$F_g = G \frac{m m_{\text{Sun}}}{d^2}$$



الشكل 11.15 قمر صناعي به شراع شمسي بالقرب من الشمس.

حيث يمثل G ثابت الجذب العام ويمثل m كتلة القمر الصناعي والشرع ويمثل m_{Sun} كتلة الشمس ويمثل d المسافة بين مركز القمر الصناعي ومركز الشمس .

بسّط يمكننا دمج كل هذه المعادلات للحصول على

$$\left(\frac{2I}{c}\right)A = G \frac{mm_{\text{Sun}}}{d^2}$$

لإيجاد قيمة مساحة الشرع الشمسي نحصل على

$$A = G \frac{cmm_{\text{Sun}}}{2Id^2}$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$A = \left(6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}\right) \frac{(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(100.0 \text{ kg})(1.99 \times 10^{30} \text{ kg})}{2(1400 \text{ W/m}^2)(1.50 \times 10^{11} \text{ m})^2} = 63,206.2 \text{ m}^2$$

قوّب نكتب النتائج مقوّبة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$A = 6.32 \times 10^4 \text{ m}^2$$

تحقق ثانية إذا كان الشرع الشمسي دائريًا، سيكون نصف قطر الشرع

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{6.32 \times 10^4 \text{ m}^2}{\pi}} = 142 \text{ m}$$

يمكننا الربط بين سمك الشرع، J ، مضروبًا في كثافة، ρ ، المادة التي تم صنع الشرع منها والكتلة لكل وحدة من مساحة الشرع:

$$J\rho = \frac{m}{A}$$

إذا كان الشرع مصنوع من مادة متينة مثل الكابتون ($\rho = 1420 \text{ kg/m}^3$) وكتلته 75 kg ، فإن سمك الشرع يساوي

$$J = \frac{75 \text{ kg}}{(1420 \text{ kg/m}^3)(6.32 \times 10^4 \text{ m}^2)} = 8.36 \times 10^{-7} \text{ m} = 0.836 \text{ } \mu\text{m}$$

الكابتون عبارة عن شريط بولي أميد تم صنعه ليظل ثابتًا في نطاق واسع من درجات الحرارة في الفضاء؛ من درجة الحرارة القريبة من الصفر المطلق إلى أكثر من 600 K . لا يمكن لتقنيات الإنتاج الحالية أن تنتج الكابتون بهذا السمك الرفيع. على الرغم من ذلك، يمكن تحقيق الكثافة الكتلية السطحية المطلوبة باستخدام مواد أخرى في المستقبل.

الشرع الذي يعمل بالليزر

مسألة محلولة 11.2

تتضمن إحدى الأفكار لدفع مركبة فضائية ذات مدى بعيد استخدام أشعة ليزر عالية القدرة، بدلًا من ضوء الشمس، وتركيزها على شرع كبير عاكس تمامًا. يمكن إذا دفع مركبة فضائية من الأرض. افترض أنه يمكن تركيز 10.0 GW من الليزر على مسافات بعيدة. تبلغ كتلة المركبة الفضائية 200.0 kg ، ولها شرع عاكس كبير بدرجة كافية لاعتراض كل الضوء المنبعث من الليزر.

المسألة

بتجاهل الجاذبية، ما الزمن الذي تستغرقه المركبة الفضائية لتبلغ سرعة 30.0% من سرعة الضوء بدءًا من السكون؟

الحل

فكر يبذل ضغط الإشعاع الصادر من الليزر قوة ثابتة على شرع المركبة الفضائية، ما ينتج عجلة ثابتة. باستخدام العجلة الثابتة، يمكننا حساب الزمن المستغرق للوصول إلى السرعة النهائية بدءًا من السكون.

ارسم يوضح الشكل 11.16 رسمًا تخطيطيًا لليزر يركز الضوء على مركبة فضائية وشرع عاكس تمامًا.



الشكل 11.16 ليزر يركّز ضوءه على مركبة فضائية تحمل شراعًا عاكسًا تمامًا.

ابحث يكون ضغط الإشعاع، p_r ، الصادر عن الضوء ببساطة I الناتج عن الليزر كما يلي

$$p_r = \frac{2I}{c}$$

يتم تعريف الضغط بأنه القوة، F ، لكل وحدة مساحة، A ، للبقعة التي يؤثر فيها الشعاع على الشراع. لذلك يمكننا كتابة المعادلة

$$\frac{2I}{c} = \frac{F}{A}$$

يتم تحديد شدة الليزر من خلال قدرة، P ، الليزر مقسومة على مساحة البقعة، A . بافتراض أن شراع هذه المركبة الفضائية يمكن أن يعترض كل أشعة الليزر، يمكننا كتابة المعادلة

$$\frac{F}{A} = \frac{2(P/A)}{c}$$

لإيجاد قيمة القوة التي تبذلها أشعة الليزر على الشراع وباستخدام قانون نيوتن الثاني، يمكننا كتابة المعادلة

$$(i) \quad F = \frac{2P}{c} = ma$$

بسّط يمكننا حل المعادلة (i) لإيجاد قيمة العجلة:

$$a = \frac{2P}{mc}$$

بافتراض أن كل قدرة الليزر ظلت مركزة على شراع المركبة الفضائية، فستتأثر المركبة الفضائية بعجلة ثابتة. إذاً يمكن ربط السرعة النهائية، v ، للمركبة الفضائية بالزمن الذي تستغرقه للوصول إلى هذه السرعة بالمعادلة

$$v = at = 0.300c$$

وبإيجاد قيمة الزمن نحصل على

$$t = \frac{0.300c}{2P/mc} = \frac{0.300mc^2}{2P}$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$t = \frac{0.300mc^2}{2P} = \frac{0.300(200.0 \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{2(10.0 \times 10^9 \text{ W})} = 270,000,000 \text{ s}$$

قرب نكتب النتائج مقربة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$t = 270,000,000 \text{ s} = 8.56 \text{ yr}$$

تحقق ثانية للتحقق ثانية من النتيجة، يمكننا حساب عجلة المركبة الفضائية:

$$a = \frac{2P}{mc} = \frac{2(10.0 \times 10^9 \text{ W})}{(200 \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})} = 0.333 \text{ m/s}^2$$

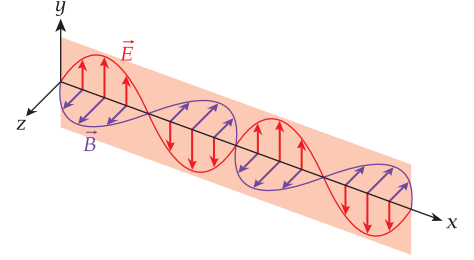
تبلغ هذه العجلة 3% من العجلة الناتجة عن الجاذبية على الأرض. يتم إنتاج هذه العجلة باستخدام ليزر تبلغ قدرته عشرة أضعاف قدرة محطة طاقة نموذجية، ويجب أن يعمل باستمرار لمدة 8.56 yr. ستبلغ المسافة التي ستقطعها المركبة الفضائية خلال هذه الفترة

$$x = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}(0.333 \text{ m/s}^2)(2.70 \times 10^8 \text{ s})^2 = 1.21 \times 10^{16} \text{ m} = 1.28 \text{ سنة ضوئية}$$

وتكون أكثر قليلاً من $\frac{1}{4}$ مرة من المسافة التي يقطعها الضوء في سنة واحدة. يجب أن يظل الليزر مركزاً على المركبة الفضائية عند هذه المسافة. ومن ثم، على الرغم من أن الحسابات تبدو معقولة، إلا أنه من الصعب تحقيق متطلبات صنع مركبة فضائية ذات شراع عاكس يتم دفعها بالليزر. سنرى لاحقاً أنه يجب تعديل هذه الحسابات لأن السرعة المتضمنة جزء مهم من سرعة الضوء.

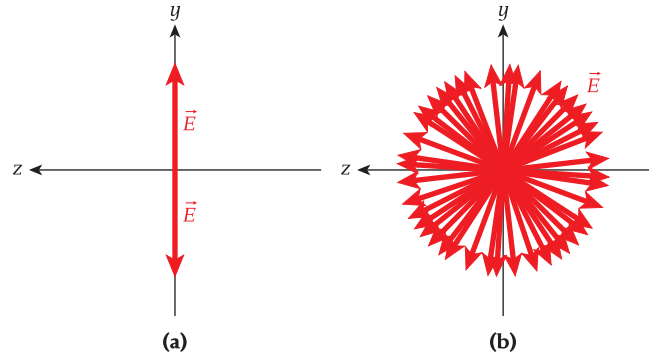
11.6 الاستقطاب Polarization

بالنسبة إلى الموجة الكهرومغناطيسية الموضحة في الشكل 11.5، يكون اتجاه المجال الكهربائي على امتداد المحور y دائمًا. ويكون اتجاه x الموجب هو اتجاه حركة الموجة. لذلك يقع المجال الكهربائي للموجات الكهرومغناطيسية ضمن مستوى التذبذب (الشكل 11.17). يمكننا تصور استقطاب الموجة الكهرومغناطيسية من خلال النظر إلى متجه المجال الكهربائي للموجة في المستوى yz الذي يكون متعامدًا على اتجاه حركة الموجة (الشكل 11.18a). يتغير متجه المجال الكهربائي من اتجاه y الموجب إلى اتجاه y السالب ثم يعود مجددًا أثناء حركة الموجة. يتذبذب المجال الكهربائي للموجة في اتجاه y فقط، ولا يغير اتجاهه أبدًا. يسمى هذا النوع من الموجات **بالموجة المستقطبة** في اتجاه y .



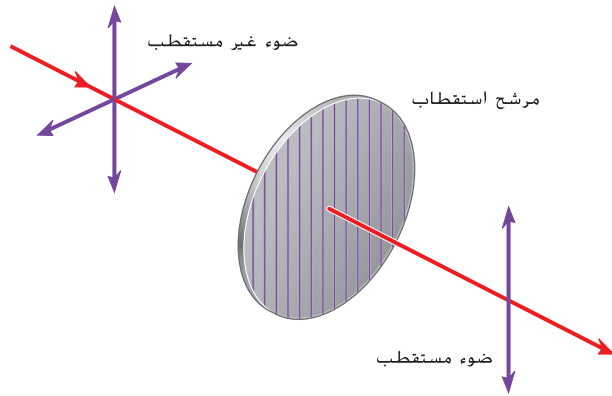
الشكل 11.17 موجة كهرومغناطيسية ذات مستوى تذبذب للمجال الكهربائي موضح باللون الوردي.

يكون للموجات الكهرومغناطيسية التي يتألف منها الضوء المنبعث من معظم مصادر الضوء الشائعة مثل الشمس أو مصباح متوهج استقطابات عشوائية. يكون لكل موجة متجه مجال كهربائي يتذبذب في مستوى مختلف. يسمى مثل هذا الضوء **بالضوء غير المستقطب**. يمكن تمثيل الضوء من المصدر غير المستقطب بالعديد من المتجهات مثل الموضحة في الشكل 11.18a. ولكن في اتجاهات عشوائية (الشكل 11.18b). يمكن أيضًا تمثيل الضوء غير المستقطب من خلال جميع مركبات y ومركبات z بشكل منفصل لإنشاء محصلة مركبات y و z . يكون للضوء غير المستقطب مركبات متساوية في الاتجاهين y و z (الشكل 11.19a). إذا كان ناتج الاستقطاب في اتجاه y أقل منها في اتجاه z ، فإن الضوء يكون مستقطبًا جزئيًا في اتجاه z (الشكل 11.19b).

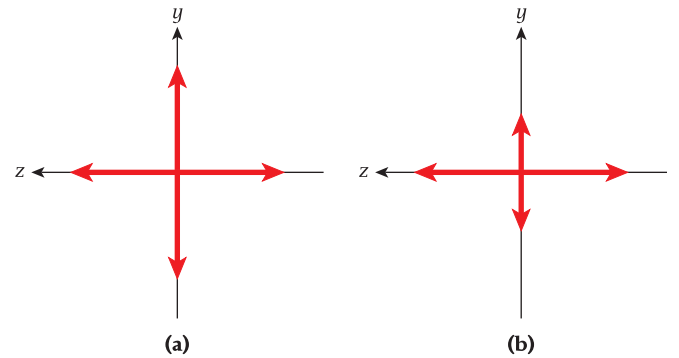


الشكل 11.18 (a) متجهات المجال الكهربائي في المستوي yz . تحدد مستوى الاستقطاب ليكون المستوي xy . (b) متجهات المجال الكهربائي تتجه بزوايا عشوائية.

يمكن تحويل الضوء غير المستقطب إلى ضوء مستقطب بتمرير الضوء غير المستقطب عبر مرشح استقطاب. يسمح **مرشح الاستقطاب** بمرور مركبة واحدة فقط من متجهات المجال الكهربائي لموجات الضوء عبره. تتمثل إحدى طرق صنع مرشح الاستقطاب في إنتاج مادة تتكون من سلاسل طويلة من الجزيئات المتوازية. لن تتناول هذه المناقشة تفاصيل البنية الجزيئية ولكن ستميز ببساطة كل مرشح استقطاب باتجاه استقطاب. يكون الضوء غير المستقطب المار عبر مرشح استقطاب عند خروجه مستقطبًا في اتجاه الاستقطاب (الشكل 11.20). يتم نقل مركبات الضوء التي لها الاتجاه نفسه مثل مرشح الاستقطاب، ولكن يتم امتصاص مركبات الضوء المتعامدة على مرشح الاستقطاب.

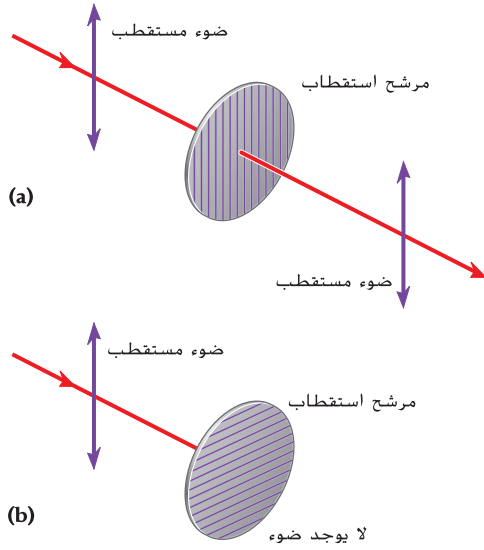


الشكل 11.20 ضوء غير مستقطب يمر عبر مرشح استقطاب عمودي. بعد مرور الضوء عبر مرشح الاستقطاب، يكون مستقطبًا رأسيًا.

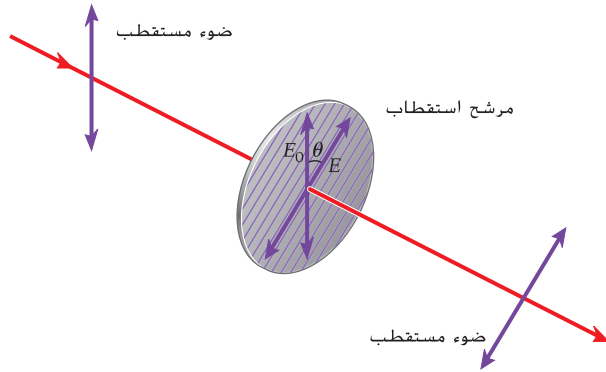


الشكل 11.19 (a) مركبات المجال الكهربائي للضوء غير المستقطب. (b) مركبات المجال الكهربائي للضوء المستقطب جزئيًا.





الشكل 11.21 (a) ضوء مستقطب رأسياً يسقط على مرشح استقطاب رأسي. (b) ضوء مستقطب رأسياً يسقط على مرشح استقطاب أفقي.



الشكل 11.22 ضوء مستقطب يمر عبر مرشح استقطاب محور الاستقطاب له غير موازي ولا عمودي على اتجاه الضوء المستقطب الساقط زاوية الاستقطاب أكبر من 0 وأقل من 90.

لنفكر الآن في شدة الضوء المار عبر مرشح الاستقطاب. يكون للضوء غير المستقطب الذي شدته I_0 مركبات متساوية في الاتجاهين y و z . بعد المرور عبر مرشح استقطاب عمودي، لا يتبقى إلا المركبة y (أو المركبة العمودية). يتم تحديد شدة الضوء، I ، المار عبر مرشح الاستقطاب بالمعادلة

$$(11.30) \quad I = \frac{1}{2} I_0$$

لأن الضوء غير المستقطب له المركبات y و z ويتم امرار مركبات y فقط عن طريق مرشح الاستقطاب. ينطبق العامل $\frac{1}{2}$ فقط على حالة الضوء غير المستقطب المار عبر مرشح استقطاب.

لنفكر في الضوء المستقطب المار عبر مرشح استقطاب (الشكل 11.21). إذا كان محور مرشح الاستقطاب موازاً لاتجاه الضوء المستقطب الساقط، فسيتم امرار كل الضوء بالاستقطاب الأصلي (الشكل 11.21a). إذا كانت زاوية الاستقطاب لمرشح الاستقطاب متعامدة على الضوء المستقطب، فلن يتم امرار أي ضوء (الشكل 11.21b).

ما الذي يحدث عندما يسقط الضوء المستقطب على مرشح استقطاب، مع أن استقطاب الضوء غير مواز ولا متعامد على زاوية استقطاب مرشح الاستقطاب (الشكل 11.22)؟ لنفترض أن الزاوية بين الضوء المستقطب الساقط وزاوية الاستقطاب هي θ . يتم تحديد مقدار المجال الكهربائي، E ، المنقول من خلال

$$E = E_0 \cos \theta$$

حيث يكون E_0 مقدار المجال الكهربائي للضوء المستقطب الساقط. من المعادلة 11.26، يمكننا رؤية أنه يتم تحديد شدة الضوء قبل المرور عبر المستقطب، I_0 ، من خلال

$$I_0 = \frac{1}{c\mu_0} E_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{2c\mu_0} E_0^2$$

بعد مرور الضوء عبر مرشح الاستقطاب، يتم تحديد الشدة، I ، من خلال

$$I = \frac{1}{2c\mu_0} E^2$$

يمكننا التعبير عن الشدة المنقولة بدلالة الشدة الابتدائية كما يلي:

$$(11.31) \quad I = \frac{1}{2c\mu_0} E^2 = \frac{1}{2c\mu_0} (E_0 \cos \theta)^2 = I_0 \cos^2 \theta$$

تسمى هذه المعادلة **بقانون مالوس**. وتنطبق فقط على الضوء المستقطب الساقط على مرشح الاستقطاب.

ثلاثة مرشحات استقطاب

مثال 11.4

افترض أن الضوء غير المستقطب الذي شدته I_0 يسقط في البداية على أول مرشح استقطاب من مرشحات الاستقطاب الثلاثة المصفوفة. يكون اتجاه استقطاب مرشح الاستقطاب الأول رأسياً زاوية الاستقطاب تساوي صفر. يبلغ قياس زاوية استقطاب مرشح الاستقطاب الثاني 45.0° بالنسبة إلى الاتجاه العمودي. يبلغ قياس زاوية استقطاب مرشح الاستقطاب الثالث 90.0° بالنسبة إلى الاتجاه العمودي.

المسألة

ما شدة الضوء بعد مروره عبر مرشحات الاستقطاب الثلاثة بدلالة الشدة الابتدائية؟

الحل

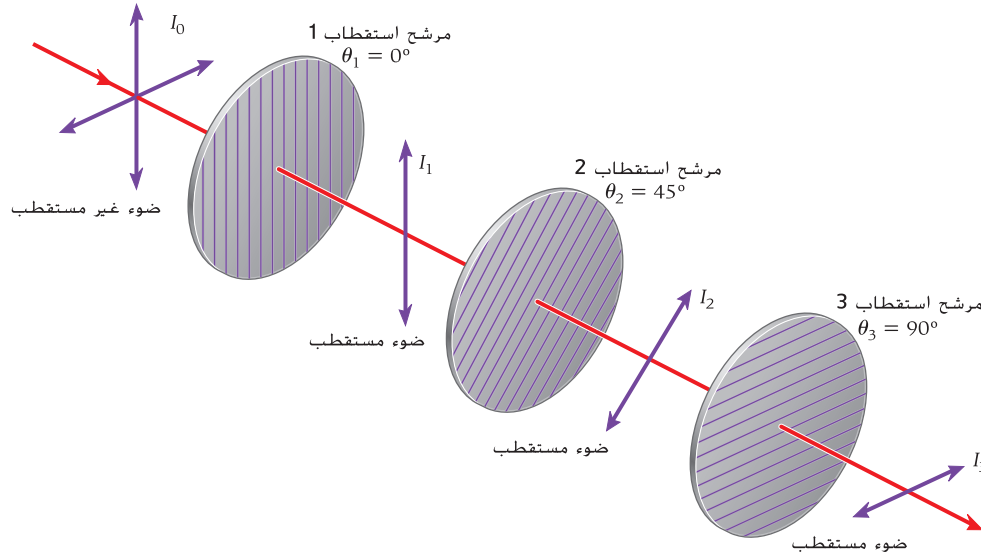
يوضح الشكل 11.23 الضوء المار عبر مرشحات الاستقطاب الثلاثة. شدة الضوء غير المستقطب هي I_0 . شدة الضوء بعد مروره عبر مرشح الاستقطاب الأول تساوي

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

شدة الضوء بعد مروره عبر مرشح الاستقطاب الثاني تساوي

$$I_2 = I_1 \cos^2 (45^\circ - 0^\circ) = I_1 \cos^2 45^\circ = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 45^\circ$$

الشكل 11.23 ضوء غير مستقطب يمر عبر ثلاثة مرشحات استقطاب.



شدة الضوء بعد مروره عبر مرشح الاستقطاب الثالث تساوي

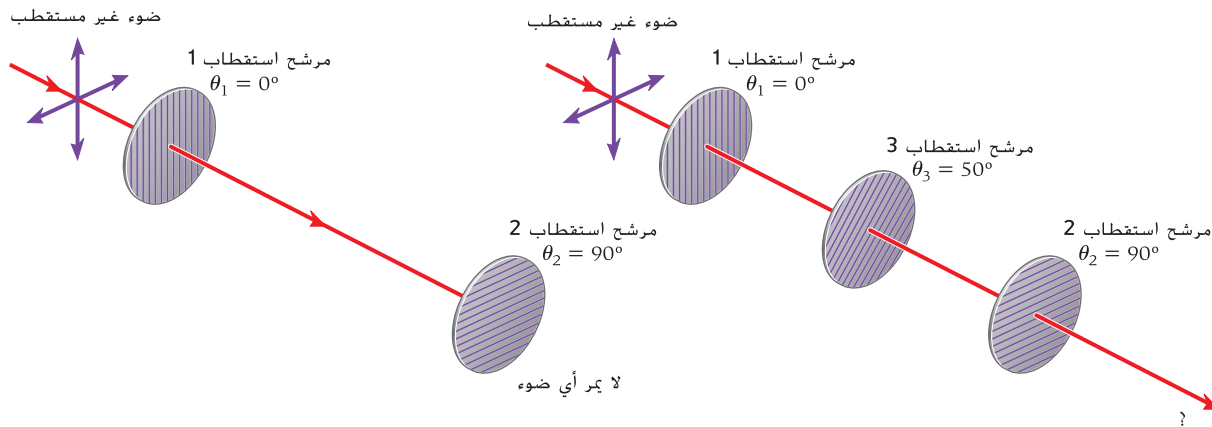
$$I_3 = I_2 \cos^2 (90^\circ - 45^\circ) = I_2 \cos^2 45^\circ = \frac{1}{2} I_0 \cos^4 45^\circ$$

$$\text{أو } I_3 = I_0/8$$

تُعد حقيقة نقل $\frac{1}{8}$ الشدة الابتدائية للضوء مذهشة نوعاً ما، لأنَّ مرشحي الاستقطاب 1 و3 لهما زاويتا استقطاب متعامدتان. إذا عمل مرشحي الاستقطاب 1 و3 بشكل مستقل، فسيحجب كل الضوء. ولكن بإضافة عقبة إضافية (المستقطب 2) بين مرشحي الاستقطاب، يمر $\frac{1}{8}$ من الشدة الأصلية. ومن ثمَّ، يمكن استخدام سلسلة من مرشحات الاستقطاب لها اختلافات بسيطة بين زوايا استقطابها لتدوير اتجاه استقطاب الضوء مع فقدان قليل في الشدة.

مراجعة المفاهيم 11.7

يبين الشكل ضوءاً غير مستقطب يسقط على مرشح استقطاب 1 بزاوية استقطاب $\theta_1 = 0^\circ$ ثم على مرشح استقطاب 2 بزاوية استقطاب $\theta_2 = 90^\circ$. ما ينتج عنه عدم مرور الضوء. إذا تم وضع مرشح الاستقطاب 3 بزاوية استقطاب $\theta_3 = 50^\circ$ بين مرشحي الاستقطاب 1 و2، فأَي من العبارات التالية يكون صحيحاً؟



- لا يمر الضوء عبر مرشحات الاستقطاب الثلاثة.
- يمر أقل من نصف شدة الضوء، من مرشحات الاستقطاب الثلاثة.
- يمر نصف شدة الضوء بالضبط، من مرشحات الاستقطاب الثلاثة.
- يمر أكثر من نصف شدة الضوء، من مرشحات الاستقطاب الثلاثة.
- يمر الضوء بالشدة نفسها من مرشحات الاستقطاب الثلاثة.

مرشحات الاستقطاب المتعددة

مسألة محلولة 11.3

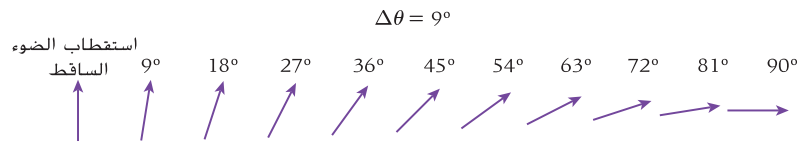
افترض أن لديك ضوءاً مستقطباً في الاتجاه الرأسى وتريد تدوير الاستقطاب إلى الاتجاه الأفقى ($\theta = 90.0^\circ$). إذا قمت بتمرير الضوء المستقطب عمودياً من خلال مرشح استقطاب ذي زاوية استقطاب تساوي 90° . فسيتم حجب كل الضوء. لكن إذا استخدمت، بدلاً من ذلك، سلسلة من عشرة مرشحات استقطاب، لكل منها زاوية استقطاب u قياسها أكبر بمقدار 9.00° من الزاوية السابقة، وكان قياس زاوية مرشح الاستقطاب الأول $\theta = 9.00^\circ$ ، يمكنك تدوير الاستقطاب بمقدار 90.0° مع الحفاظ على مرور الضوء عبرها.

المسألة

ما نسبة شدة الضوء المار من شدة الضوء الساقط والذي يمر عبر مرشحات الاستقطاب العشرة؟

الحل

فكر يتم تدوير كل مرشح استقطاب بمقدار 9.00° بالنسبة إلى مرشح الاستقطاب السابق. ومن ثم، يمر كل مرشح استقطاب نسبة من الشدة الساقطة عليه يساوي $f = \cos^2 9^\circ$. إذاً يكون النسبة الكلية المارة المتتوال f_{10} .



الشكل 11.24 اتجاه استقطاب الضوء الساقط واتجاه زوايا الاستقطاب لعشرة مرشحات استقطاب.

ارسم يوضح الشكل 11.24 اتجاه الاستقطاب الأولي واتجاهات مرشحات الاستقطاب العشرة.

ابحث نحدد شدة الضوء المستقطب، I ، المار عبر مرشح الاستقطاب الذي يصنع اتجاه الاستقطاب فيه زاوية θ مع استقطاب الضوء الساقط بالمعادلة

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

إذا كان I_0 شدة الضوء المستقطب الساقط، ففي هذه الحالة، يتم تدوير اتجاه الاستقطاب لكل مرشح استقطاب متعاقب بمقدار $\Delta\theta = 9^\circ$ بالنسبة إلى اتجاه الاستقطاب لمرشح الاستقطاب السابق. ومن ثم، يقلل كل مرشح استقطاب الشدة حسب المعامل

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2 \Delta\theta$$

حوّل إلى أبسط صورة. انخفاض الشدة بعد مرور الضوء عبر عشرة مرشحات استقطاب، يختلف اتجاه استقطاب كل منها عن مرشح الاستقطاب السابق له بمقدار $\Delta\theta$ هو

$$\frac{I_{10}}{I_0} = (\cos^2 \Delta\theta)^{10}$$

احسب بالتعويض بالقيم العددية، نحصل على

$$\frac{I_{10}}{I_0} = (\cos^2 9^\circ)^{10} = 0.780546$$

قرب نكتب النتائج مقربة إلى ثلاثة أرقام معنوية:

$$\frac{I_{10}}{I_0} = 0.781 = 78.1\%$$

تحقق ثانية باستخدام عشرة مرشحات استقطاب، تم تدوير كل منها بمقدار 9° بالنسبة إلى مرشح الاستقطاب السابق، تم تدوير استقطاب الضوء المستقطب الساقط بمقدار 90° وتم إمرار 78.1% من شدة الضوء، في حين أن استخدام مرشح استقطاب واحد تم تدويره بمقدار 90° يؤدي إلى حجب كل الضوء الساقط. لمعرفة ما إذا كانت إجابتنا معقولة، لنفترض أنه بدلاً من عشرة مرشحات استقطاب، قمنا باستخدام n مرشحات استقطاب، تم تدوير كل منها بزاوية $\Delta\theta = \theta_{\max}/n$ ، حيث $\theta_{\max} = 90^\circ$. بالنسبة إلى كل مرشح استقطاب، تكون الزاوية بين اتجاه الاستقطاب له ولرشح الاستقطاب السابق صغيرة، لذا يمكننا استخدام تقريبات الزوايا الصغيرة $\cos \Delta\theta$ لكتابة

$$\frac{I_1}{I_0} \approx \left(1 - \frac{(\Delta\theta)^2}{2}\right)^2$$

- يتبع

إذا تكون شدة الضوء التي تمر عبر مرشحات الاستقطاب n هي

$$\frac{I_n}{I_0} \approx \left(1 - \frac{(\theta_{\max}/n)^2}{2}\right)^{2n} = \left(1 - \frac{\theta_{\max}^2}{2n^2}\right)^{2n}$$

وبالنسبة إلى عدد n الكبير،

$$\frac{I_n}{I_0} \approx 1 = 100\%$$

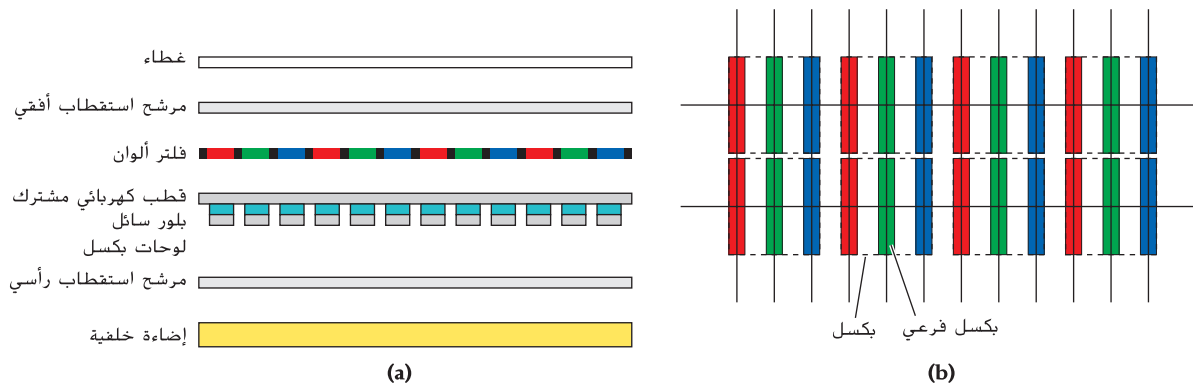
يسمح استخدام عشرة مستقطبات لتدوير استقطاب الضوء المستقطب الساقط بمرور 78.1% من شدة الضوء. سيسمح استخدام المزيد من مرشحات الاستقطاب مع تغييرات أصغر في اتجاه الاستقطاب للإرسال بالوصول إلى نسبة 100%. ومن ثَمَّ، تبدو النتيجة التي توصلنا إليها منطقية.

تطبيقات الاستقطاب

للاستقطاب العديد من التطبيقات العملية. تحتوي النظارات الشمسية غالبًا على طبقة مستقطبة تحجب الضوء المنعكس، والذي عادة ما يكون مستقطبًا. تحتوي شاشة الكمبيوتر أو التلفزيون بتقنية البلورات السائلة (LCD) على مصفوفة من البلورات السائلة المحصورة بين مرشحي استقطاب تم تدوير زاوية الاستقطاب لهما بمقدار 90° كل منهما بالنسبة إلى الآخر عادةً. ما تقوم البلورات السائلة بتدوير استقطاب الضوء بين مرشحي الاستقطاب بحيث يمر الضوء خلالهما. تطبق مصفوفة من الأقطاب الكهربائية القابلة للتعديل لهذا متغيرًا عبر كل من البلورات السائلة، ما يؤدي إلى تدوير البلورات السائلة للاستقطاب بدرجة أقل، ومن ثم تعتيم المنطقة التي يغطيها القطب الكهربائي. بعد ذلك، تستطيع شاشة التلفزيون أو شاشة الكمبيوتر عرض عدد كبير من عناصر الصورة، أو وحدات البكسل، التي تنتج صورة عالية الدقة.

يوضح الشكل 11.25a منظرًا علويًا لطبقات شاشة LCD. ينبعث الضوء غير المستقطب من الإضاءة الخلفية، يمر هذا الضوء عبر مرشح استقطاب رأسي. ثم يمر الضوء المستقطب عبر طبقة شفافة من لوحات البكسل الموصلة. تم تصميم هذه اللوحات لتوصيل مقادير متفاوتة من الجهد الكهربائي عبر الطبقة التالية، التي تتكون من بلورات سائلة، بالنسبة إلى القطب المشترك الشفاف. إذا لم يتم تطبيق أي جهد كهربائي عبر البلورات السائلة، فإنها تقوم بتدوير استقطاب الضوء الساقط بمقدار 90° درجة. هذا الضوء ذو الاستقطاب الذي تم تدويره يمكن أن يمر عبر القطب الكهربائي الشفاف المشترك ومرشح اللون ومرشح الاستقطاب الأفقي وغطاء الشاشة. عندما يتم تطبيق الجهد الكهربائي بمقادير متفاوتة على لوحة البكسل، تقوم البلورات السائلة بتدوير استقطاب الضوء الساقط بمقادير مختلفة. عندما يتم تطبيق الجهد الكهربائي الكامل بلوحة البكسل، لا يتم تدوير استقطاب الضوء الساقط، ويقوم مرشح الاستقطاب الأفقي بحجب أي ضوء يتم نقله من خلال القطب الكهربائي الشفاف المشترك ومرشح اللون.

يوضح الشكل 11.25b منظرًا أماميًا لجزء صغير من شاشة LCD، موضحًا كيف تنتج الشاشة صورة. يتم إنشاء الصورة من خلال مصفوفة من وحدات البكسل. تنقسم كل وحدة بكسل إلى ثلاث وحدات بكسل فرعية: واحدة حمراء وأخرى خضراء وثالثة زرقاء. من خلال تغيير الجهد الكهربائي عبر كل وحدة بكسل فرعية، يتم إنشاء تراكب من الضوء الأحمر والأخضر والأزرق، ما يؤدي إلى إنتاج لون على هذا البكسل. ومع ذلك، يصعب توصيل سلك واحد بكل بكسل فرعي. تحتوي شاشة LCD عالية الوضوح بدقة 1080p على 1080 مضيئًا في 1920 مضيئًا في 3 وحدات بكسل فرعية



الشكل 11.25 (a) منظر علوي للطبقات التي تشكل شاشة LCD. (b) منظر أمامي لمجموعة فرعية من وحدات البكسل ووحدات البكسل الفرعية على شاشة LCD.

أو 6,220,800 وحدة بكسل فرعية. تتصل وحدات البكسل الفرعية هذه على هيئة أعمدة وصفوف. كما هو موضح في الشكل 11.25b. لتشغيل وحدة بكسل فرعية، يجب تطبيق جهد كهربائي من كل من العمود والصف. ومن ثم، يتم تشغيل وحدات البكسل على الصف الواحد في وقت واحد. وأثناء تشغيل الجهد الكهربائي في صف واحد، يتم تشغيل الجهد الكهربائي للوحدات الفرعية في الأعمدة المطلوبة. يحتفظ مكثف صغير بالجهد الكهربائي حتى يتم تشغيل الصف مرة أخرى.

يتم مسح شاشة LCD بدقة 1080p عالية الوضوح 60 مرة في الثانية، لتنتج صورة كاملة في كل مرة. وعلى شاشة 1080i عالية الوضوح، يتم مسح صف من كل صفين من الصورة 60 مرة في الثانية ثم يتم دمج الصورتين. ثمة معيار آخر عالي الوضوح هو 720p، والذي يقوم بمسح 720 صفًا 60 مرة في الثانية بدقة أفقية 1280 بكسل. تستخدم معايير 720p و 1080i في البث التلفزيوني بشكل شائع. الدقة القياسية للصورة التلفزيونية هي 480i، مع تحديث صف من كل صفين 60 مرة في الثانية وإنتاج 640 عمودًا من وحدات البكسل.

يتضمن عرض الأفلام ثلاثية الأبعاد أيضًا استخدام مرشحات الاستقطاب. يتم تزويد رواد السينما بنظارات بها مرشحات استقطاب مختلفة مضمنة في كل عدسة. يولد جهاز العرض صورتين مختلفتين باستقطابين مختلفين على الشاشة. تكون لهاتين الصورتين أيضًا إزاحة قليلة بعضها عن بعض، ويقوم دماغ المشاهد ببناء الخيال ثلاثي الأبعاد من خلال الجمع بين الصورتين المزاحيتين. تستخدم أنظمة العرض القديمة مرشحات الاستقطاب الخطي مع اتجاهات استقطاب متعامدة بعضها على بعض. ومع ذلك، ينتج هذا النوع من النظام تأثيرات ثلاثية الأبعاد تتقلص عندما يميل المشاهدون برؤوسهم جانبًا.

تستخدم أجهزة عرض الأفلام ثلاثية الأبعاد الحديثة مرشحات استقطاب دائرية. يأتي الضوء المستقطب الدائري في مجموعتين متعامدتين، دائرية من اليسار ودائرية من اليمين. تعمل مرشحات الاستقطاب الدائري تمامًا مثل مرشحات الاستقطاب الخطي، وفقًا لنص مناظر من قانون مالوس. تحتوي نظارات العرض ثلاثية الأبعاد المستخدمة مع هذه الأجهزة الحديثة على عدسة واحدة تمرر الضوء الدائري المستقطب من اليسار، وعدسة أخرى تمرر الضوء المستقطب الدائري المستقطب من اليمين. ينتج هذا النوع من النظارات تأثيرات ثلاثية الأبعاد لا تتأثر عند إمالة المشاهد رؤوسهم.

يوجد اختلاف واحد مهم بين الضوء المستقطب خطيًا والضوء المستقطب دائريًا: يظل الضوء المستقطب خطيًا في حالة الاستقطاب نفسها بعد انعكاسه على مرآة. في حين يغير الضوء المستقطب دائريًا حالته من ضوء مستقطب دائري يساري إلى ضوء مستقطب دائري يميني أو العكس بالعكس. يوضح الشكل 11.26 تجربة شبيقة يمكنك إجراؤها بنفسك: أمسك نظارة عرض ثلاثية الأبعاد ذات استقطاب دائري أمام مرآة والتقط صورة من خلال إحدى العدستين. يمكنك أن تلاحظ أن الضوء الذي يمر عبر العدسة اليسرى وينعكس من المرآة، ثم يمر عبر العدسة نفسها مرة أخرى قد خفت بشكل كامل. وعلى النقيض من ذلك، ينتقل الضوء عبر العدسة اليسرى وينعكس من المرآة، ثم يمر عبر العدسة اليمينية دون أن يخفت. إذا تم استخدام نظارات ثلاثية الأبعاد ذات مرشحات استقطاب خطي في هذه التجربة بدلًا من ذلك، فسينتقل الضوء عبر العدسات بنصف شدته الأصلية (المعادلة 11.30)، ويمكن رؤية الصورة الكاملة للهاتف المزود بالكاميرا في المرآة.



الشكل 11.26 كاميرا هاتف تلتقط

صورة انعكاسها في المرآة من خلال نظارة عرض ثلاثية الأبعاد ذات مرشحات استقطاب دائرية. تستقطب عدسة واحدة من النظارة الضوء بنمط دائري من اليسار، والأخرى تستقطب الضوء بنمط دائري من اليمين.

11.7 اشتقاق المعادلة الموجية Derivation of the Wave Equation

يسرد الجدول 11.1 المعادلات الأربع المعروفة باسم معادلات ماكسويل في صورة تكامل. ثمة صيغ تفاضلية مكافئة أيضًا لهذه المعادلات، وهي الطريقة التي تستخدم عادة لطباعتها على القمصان والملصقات:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0},$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B},$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} + \mu_0 \vec{j}$$

9

حيث ρ هي كثافة الشحنة (الشحنة q لكل وحدة حجم) و \vec{j} هي الكثافة الحالية. وتكون قيمة كل منهما صفرًا في الفراغ وفي غياب الشحنات؛ $\rho = 0$ و $\vec{j} = 0$. الرمز $\vec{\nabla}$ هو عامل التدرج، الذي يمثل المتجه ذا المشتقات الجزئية في كل اتجاه. في الإحداثيات الديكارتية، يكون $\vec{\nabla} = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$. في القسم 11.2، رأينا أنَّ الموجات الكهرومغناطيسية كما وصفتها المعادلة 11.8 عبارة عن حلول صالحة لجميع معادلات ماكسويل في الفراغ. ومع ذلك، على وجه الدقة، لم نكتب بعد المعادلة الموجية التي يتبعها المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي. الآن، بمساعدة الشكل التفاضلي لمعادلات ماكسويل، يمكننا أن نشق المعادلة الموجية للمجال الكهربائي، وهي

$$(11.32) \quad \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} - c^2 \nabla^2 \vec{E} = 0$$

المعادلة الموجية للمجال المغناطيسي هي

$$(11.33) \quad \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{B} - c^2 \nabla^2 \vec{B} = 0$$

11.1 الاشتقاق المعادلة الموجية للمجال الكهربائي في الفراغ

لاشتقاق المعادلة الموجية للمجال الكهربائي في الفراغ، نأخذ ناتج الضرب المتجهي لمعادلة ماكسويل الثانية وعامل التدرج، $\vec{\nabla}$:

$$(i) \quad \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\vec{\nabla} \times \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}$$

على الجانب الأيمن من المعادلة (i)، يمكننا تبديل ترتيب المشتق الزمني والمشتق المكاني:

$$(ii) \quad -\vec{\nabla} \times \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = -\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}$$

تستفيد الخطوة الثانية في هذا التحويل من معادلة ماكسويل الثالثة حيث $\vec{j} = 0$ ، والتي تكون مناسبة في الفراغ. الجانب الأيسر من المعادلة (i) عبارة عن ناتج ضرب متجهي مزدوج. هذه قاعدة BAC-CAB الخاصة بناتج الضرب المتجهي المزدوج: $\vec{A} \times (\vec{B} \times \vec{C}) = \vec{B}(\vec{A} \cdot \vec{C}) - \vec{C}(\vec{A} \cdot \vec{B})$. وبتطبيق هذه القاعدة، نجد أنَّ

$$(iii) \quad \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\nabla^2 \vec{E}$$

حيث يتم استخدام معادلة ماكسويل الأولى ($\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ in vacuum) في الخطوة الثانية. بعد الرمز ∇^2 ناتج الضرب القياسي لعامل التدرج في نفسه، $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$. إذا عوضنا بالمعادلتين (ii) و (iii) في المعادلة (i) واستخدمنا حقيقة أنَّ سرعة الضوء تساوي $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ (المعادلة 11.20) نحصل على المعادلة الموجية المطلوبة:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} - \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \nabla^2 \vec{E} = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} - c^2 \nabla^2 \vec{E} = 0$$

يقتضي هذا أنَّ الموجات الكهرومغناطيسية التي تتحرك بسرعة الضوء هي في الواقع عبارة عن حل لمعادلات ماكسويل. كما تمت مناقشته (ولكن ليس إثباته تمامًا) في القسم 11.2.

سؤال الاختبار الذاتي 11.4

قم باشتقاق معادلة الموجة للمجال المغناطيسي (المعادلة 11.33) بنفس الطريقة التي يتعامل بها الاشتقاق 11.1 مع معادلة الموجة للمجال الكهربائي.

سؤال الاختبار الذاتي 11.5

أثبت أنَّ $\vec{E}(\vec{r}, t) = E_{\max} \sin(\kappa x - \omega t) \hat{y}$ و $\vec{B}(\vec{r}, t) = B_{\max} \sin(\kappa x - \omega t) \hat{z}$ في الواقع حلول للمعادلة الموجية للمجالين الكهربائي والمغناطيسي.

ما تعلمناه | دليل المذاكرة للاختبار

- يمكن ربط سرعة الضوء بالثابتين الكهرومغناطيسيين الأساسيين:

$$c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$
- القدرة اللحظية لكل وحدة مساحة التي تحملها الموجة الكهرومغناطيسية تساوي مقدار متجه بوينتج، $S = [1/(c\mu_0)]E^2$. حيث E هو مقدار المجال الكهربائي.
- يتم تعريف شدة الموجة الكهرومغناطيسية على أنها متوسط القدرة لكل وحدة مساحة التي تحملها الموجة، $I = S_{avg} = [1/(c\mu_0)]E_{rms}^2$. حيث E_{rms} هو مقدار القيمة الفعالة للمجال الكهربائي.
- بالنسبة إلى الموجة الكهرومغناطيسية، تكون كثافة الطاقة التي يحملها المجال الكهربائي $u_E = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ ، وكثافة الطاقة التي يحملها المجال المغناطيسي $u_B = [1/(2\mu_0)]B^2$. بالنسبة إلى أي موجة كهذه، $u_E = u_B$.
- يُحدد الضغط الإشعاعي الذي تبذله الموجات الكهرومغناطيسية التي تبلغ شدتها I بالعلاقة $p_r = I/c$ إذا تم امتصاص الموجات الكهرومغناطيسية بالكامل أو يُحدد بالعلاقة $p_r = 2I/c$ إذا انعكست الموجات تمامًا.
- يُحدد استقطاب الموجة الكهرومغناطيسية بواسطة اتجاه متجه المجال الكهربائي.
- شدة الضوء غير المستقطب الذي مر عبر مرشح الاستقطاب هي $I = I_0/2$. حيث I_0 شدة الضوء غير المستقطب الساقط على مرشح الاستقطاب.
- شدة الضوء المستقطب الذي مر عبر مرشح الاستقطاب هي $I = I_0 \cos^2 \theta$. حيث I_0 شدة الضوء الساقط على مرشح الاستقطاب و θ هي الزاوية بين اتجاه الضوء الساقط وزاوية استقطاب مرشح الاستقطاب.
- عندما يتم شحن مكثف، يمكن تصوير تيار الإزاحة بين الألواح، المعطى بالمعادلة $i_d = \epsilon_0 d\Phi_E/dt$. حيث Φ_E هو التدفق الكهربائي.
- تصف معادلات ماكسويل مدى تأثير الشحنات الكهربائية والتيارات والمجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية بعضها في بعض، ما يشكل نظرية موحدة للكهرومغناطيسية.
- قانون جاوس للمجالات الكهربائية،

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q_{enc}/\epsilon_0$$
يربط التدفق الكهربائي الكلي عبر سطح مغلق بالشحنة الكهربائية الكلية المحصورة.
- ينص قانون جاوس للمجالات المغناطيسية،

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$
على أنَّ محصلة التدفق المغناطيسي عبر أي سطح مغلق يساوي صفرًا.
- قانون فاراداي للحث، $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -d\Phi_B/dt$. يربط المجال الكهربائي المستحث بالتدفق المغناطيسي المتغير.
- قانون ماكسويل - أمبير،

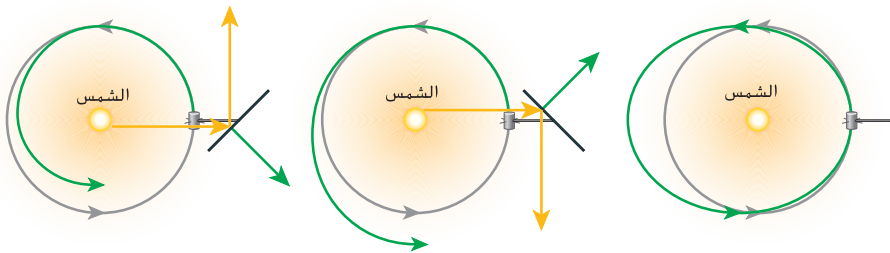
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 d\Phi_E/dt + \mu_0 i_{enc}$$
يربط المجال المغناطيسي المستحث بالتدفق الكهربائي المتغير والتيار.
- بالنسبة إلى الموجة الكهرومغناطيسية التي تتحرك في اتجاه x الموجب، يمكن وصف المجالات الكهربائية والمغناطيسية بالمعادلة

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_{max} \sin(\kappa x - \omega t) \hat{y}$$
و
$$\vec{B}(\vec{r}, t) = B_{max} \sin(\kappa x - \omega t) \hat{z}$$
حيث $\kappa = 2\pi/\lambda$ و $\omega = 2\pi f$ هو التردد الزاوي. هو رقم الموجة.
- ترتبط مقادير المجالات الكهربائية والمغناطيسية للموجة الكهرومغناطيسية في أي زمن ومكان ثابتين بسرعة الضوء، $E = cB$.

إجابات أسئلة الاختبار الذاتي

الشمس أو كتلة الجسم قد نقصت قليلاً فجأة. ولأن القوة متعامدة على السرعة المتجهة للقمر الصناعي، فإنَّ طاقة القمر الصناعي لا تتأثر.

ستؤدي زاوية الانتشار 2 إلى مدار متزايد. وتنتج القوة الناشئة عن الضوء المنعكس مركباً للقوة في الاتجاه نفسه الخاص بالسرعة المتجهة للمركبة الفضائية. ومن ثمَّ، تكتسب المركبة الفضائية طاقة، ويزداد نصف قطر المدار. لاحظ أن سرعة المركبة الفضائية تتناقص ولكن يزيد إجمالي طاقتها.



الزاوية 3

الزاوية 2

الزاوية 1

$$c = \lambda f \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} \quad 11.2$$

$$\lambda_{FM} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m}}{90.5 \times 10^6 \text{ Hz}} = 3.31 \text{ m}$$

$$\lambda_{AM} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m}}{870 \times 10^3 \text{ Hz}} = 345 \text{ m}$$

11.3 ستنتج زاوية الانتشار 1 مداراً بيضاوياً مع الشمس عند بؤرة واحدة. تعتمد القوة الناتجة عن الضغط الإشعاعي على مربع معكوس المسافة. تماماً كما هو الحال بالنسبة إلى قوة الجاذبية. ومن ثمَّ، فإنَّ المدار سيصبح على شكل قطع ناقص، كما لو أنَّ كتلة

الطرف الأيمن من هذه المعادلة هو

$$\epsilon_0 \mu_0 \vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

الطرف الأيسر هو $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} = -\nabla^2 \vec{B}$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \sin(\kappa x - \omega t) = -\omega^2 \sin(\kappa x - \omega t) \quad 11.5$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \sin(\kappa x - \omega t) = -\kappa^2 \sin(\kappa x - \omega t)$$

ومن ثم، فإن هذه الدالة تمثل حلاً للمعادلة $c = \omega/\kappa$.

ستؤدي زاوية الانتشار 3 إلى مدار متناقص. وتنتج القوة الناشئة عن الضوء المنعكس مركباً للقوة في عكس اتجاه السرعة المتجهة للمركبة الفضائية. ومن ثم، تفقد المركبة الفضائية طاقة، ويقل نصف قطر المدار. لاحظ أن سرعة المركبة الفضائية تتزايد ولكن يتناقص إجمالي طاقتها.

11.4 احسب ناغ الضرب المتجهي لعامل التدرج $\vec{\nabla}$ ومعادلة

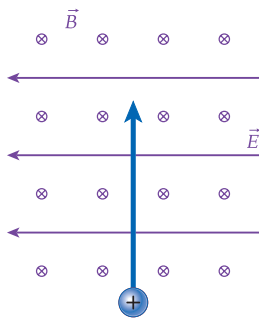
$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

إرشادات حل المسائل

1. تنطبق العلاقات الأساسية نفسها التي تميز أي موجات على الموجات الكهرومغناطيسية. تذكر أن $c = \lambda f$ و $\omega = ck$. حيث يمثل c سرعة الموجة الكهرومغناطيسية.

2. من المفيد غالباً رسم مخطط يوضح اتجاه حركة الموجة واتجاه المجالين الكهربائي والمغناطيسي. تذكر العلاقات بين \vec{E} و \vec{B} لكل من المقدار والاتجاه، بما في ذلك $E/B = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2} = c$ للموجات الكهرومغناطيسية.

أسئلة الاختيار من متعدد



11.6 يتحرك بروتون بشكل عمودي على مجال كهربائي ومجال مغناطيسي متقاطعين كما هو موضح في الشكل. ما اتجاه القوة المحصلة على البروتون؟

- (a) إلى اليسار
(b) إلى اليمين
(c) إلى داخل الصفحة
(d) إلى خارج الصفحة

11.7 يتوقع وجود "الشحنات" المغناطيسية المعزولة (أقطاب مغناطيسية أحادية) في مكان ما في الكون.

أي من معادلات ماكسويل، (1) قانون جاوس للمجالات الكهربائية و/أو (2) قانون جاوس للمجالات المغناطيسية و/أو (3) قانون فاراداي للحث و/أو (4) قانون ماكسويل - أمبير، سيتم تغييره بوجود الأقطاب المغناطيسية الأحادية؟

- (a) فقط (2) و (b) فقط (1) و (c) (2) و (3) و (d) (3) فقط

11.8 وفقاً لقانون جاوس للمجالات المغناطيسية، تشكل جميع خطوط المجال المغناطيسي حلقة كاملة. لذلك، يشير اتجاه المجال المغناطيسي \vec{B} من القطب _____ إلى القطب _____ خارج المغناطيس القضيب العادي ومن القطب _____ إلى القطب _____ داخل المغناطيس.

- (a) الشمالي، الجنوبي، الشمالي، الجنوبي (c) الجنوبي، الشمالي، الجنوبي، الشمالي
(b) الشمالي، الجنوبي، الجنوبي، الشمالي (d) الجنوبي، الشمالي، الشمالي، الجنوبي

11.9 ضوء غير مستقطب شدته $I_{in} = 1.87 \text{ W/m}^2$ يمر عبر مرشحي استقطاب. الضوء المستقطب النافذ شدته $I_{out} = 0.383 \text{ W/m}^2$. ما الزاوية بين مرشحي الاستقطاب؟

- (a) 23.9° (c) 50.2° (e) 88.9°
(b) 34.6° (d) 72.7°

11.10 يبلغ متوسط شدة ضوء الشمس على سطح الأرض 1400 W/m^2 تقريباً. إذا كانت الشمس متعامدة، متوسط المسافة بين الأرض والشمس يساوي $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$. ما متوسط الطاقة المنبعثة من الشمس؟

- (a) $99.9 \times 10^{25} \text{ W}$ (c) $6.3 \times 10^{27} \text{ W}$ (e) $5.9 \times 10^{29} \text{ W}$
(b) $4.0 \times 10^{26} \text{ W}$ (d) $4.3 \times 10^{28} \text{ W}$

11.1 أي من الظواهر التالية يمكن ملاحظته في الموجات الكهرومغناطيسية ولكن لا توجد في الموجات الصوتية؟

- (a) التداخل (c) الاستقطاب (e) الانتشار
(b) الحيود (d) الامتصاص

11.2 أي من العبارات التالية المتعلقة بالموجات الكهرومغناطيسية غير صحيحة؟ (اختر كل ما ينطبق.)

- (a) تنتقل الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ بسرعة الضوء.
(b) يتساوى مقدارا المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي.
(c) يتعامد متجه المجال الكهربائي فقط على اتجاه انتشار الموجة.
(d) يتعامد كل من متجه المجال الكهربائي ومتجه المجال المغناطيسي على اتجاه الانتشار.

(e) لا تحمل الموجة الكهرومغناطيسية الطاقة إلا عندما يكون $E = B$.

11.3 تعلن إذاعة الشارقة أنها "تبث إلى منطقة معينة على نطاق 49 متراً". ما التردد الذي تبث به الإذاعة؟

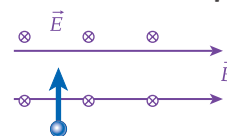
- (a) 820 kHz (d) المعلومات المقدمة لا تقدم شيئاً عن التردد.
(b) 6.12 MHz
(c) 91.7 MHz

11.4 أي مما يلي يبذل أكبر كمية من ضغط الإشعاع؟

- (a) مؤشر ليزر بقوة 1 mW على بقعة قطرها 2 mm على بعد 1 m
(b) مصباح كهربائي بقوة 200 W على بقعة قطرها 4 mm على بعد 10 m
(c) مصباح كهربائي بقوة 100 W على بقعة قطرها 2 mm على بعد 4 m
(d) مصباح كهربائي بقوة 200 W على بقعة قطرها 2 mm على بعد 5 m
(e) يبذل كل ما سبق الضغط نفسه.

11.5 ما اتجاه القوة المحصلة على الشحنة الموجبة المتحركة في الشكل؟

- (a) إلى داخل الصفحة (c) إلى خارج الصفحة
(b) إلى اليمين (d) إلى اليسار



أسئلة مفاهيمية

11.16 وضح أن قانون أمبير لا يكون متسقاً بالضرورة إذا كان السطح الذي يتم حساب التدفق عبره عبارة عن سطح مغلق، ولكن قانون ماكسويل – أمبير يكون متسقاً دائماً. (ومن ثمَّ، فإنَّ مقدمة ماكسويل لقانون الحث وثير الإزاحة ليست اختيارية؛ فهي ضرورية من الناحية المنطقية). وضح أيضاً أنَّ قانون فاراداي للحث لا يخضع لمشكلة عدم الاتساق هذه.

11.17 معادلات ماكسويل وقوانين نيوتن للحركة غير متسقة بشكل متبادل؛ حيث يتصدع الصرح العظيم للفيزياء الكلاسيكية بدرجة هائلة. اشرح السبب.

11.18 عملياً، كل من درس الطيف الكهرومغناطيسي تساءل كيف سيظهر العالم إذا استطعنا أن نرى نطاق الترددات الذي يضيء الجوابات العشر التي يمكننا سماعها بدلاً من أن نرى أقل من جواب واحد. (يشير الجواب إلى عامل قدره 2 في التردد). لكن هذا مستحيل عملياً. لماذا؟

11.19 تمتد الموجات الكهرومغناطيسية المتناحية بشكل منتظم إلى الخارج في جميع الاتجاهات في ثلاثة أبعاد. لا تعد الموجات الكهرومغناطيسية الصادرة من مصدر صغير منتج موجات مستوية لها سعات قصوى ثابتة.

(a) إلى أي مدى تختلف السعة القصوى للمجال الكهربائي للإشعاع من مصدر صغير منتج باختلاف المسافة من المصدر؟
(b) قارن هذا بالمجال الإلكتروني للشفعة النقطية.

11.20 تم تثبيت نظارة شمسية أمام شاشة كمبيوتر مسطحة (في وضع التشغيل) بحيث تكون العدسات دائمة موازية للشاشة. عندما يتم تدوير العدسات، يلاحظ أن شدة الضوء القادم من الشاشة والمار خلال العدسات متفاوتة. لماذا؟

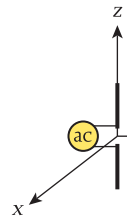
11.21 يتم وضع مرشحي استقطاب بحيث يتقاطعا بزاوية 90° . ومن ثم عندما يسقط الضوء خلف المرشحين، لا يمر الضوء من خلالهما. يتم إدراج مرشح ثالث بين المرشحين، مع وضعه في البداية بشكلٍ محاذٍ لأحدهما. صف ماذا يحدث أثناء تدوير المرشح الأوسط بزاوية 360° .

11.11 في تجربة الضوء المستقطب، يُستخدم إعداد مشابه للإعداد في الشكل 11.23. سقط ضوء غير مستقطب كثافته I_0 على مرشح استقطاب 1. يعبر الضوء من مرشحي الاستقطاب 1 و3 (بزاوية 90°). مع ثبات اتجاهيهما أثناء التجربة. في البداية، كانت زاوية مرشح الاستقطاب 2 تساوي 45° . بعد ذلك، عند الزمن $t = 0$ ، يبدأ مرشح الاستقطاب 2 بالدوران بسرعة زاوية ω حول اتجاه انتشار الضوء في اتجاه عقارب الساعة وفقاً لما يراه ملاحظ ينظر إلى مصدر الضوء. يُستخدم صمام ثنائي ضوئي لمراقبة شدة الضوء الخارج من مرشح الاستقطاب 3.

(a) حدد تعبيراً لهذه الشدة في صورة دالة للزمن.

(b) كيف يمكن أن يتغير التعبير من الجزء (a) إذا تم تدوير مرشح الاستقطاب 2 حول محور مواز لاتجاه انتشار الضوء ولكن تمت إزاحته بمسافة $d < R$ ، حيث R هو نصف قطر مرشح الاستقطاب؟

11.12 يقع هوائي ثنائي القطب عند نقطة الأصل ومحوره على طول المحور z . كلما تذبذب التيار الكهربائي للهوائي، تحرك الإشعاع الكهرومغناطيسي المستقطب بعيداً عن الهوائي على طول المحور y الموجب. ما الاتجاهات المحتملة للمجالين الكهربائي والمغناطيسي عند النقطة A على المحور y ؟ اشرح ذلك.



11.13 هل تؤثر المعلومات الواردة في القسم

11.6 في الإجابة على المثال 11.2 فيما يتعلق

بمقدار جذر متوسط مربع المجال الكهربائي على سطح الأرض من الشمس؟

11.14 تتوقع معادلات ماكسويل عدم وجود الأقطاب المغناطيسية الأحادية. إذا كانت الأقطاب الأحادية هذه موجودة، فكيف يمكن أن تتغير حركة الجسيمات المشحونة عند اقترابها من قطب أحادي كهذا؟

11.15 إذا تم إرسال إشارتي اتصال في الوقت نفسه إلى القمر، واحدة عبر موجات الراديو وواحدة عبر الضوء المرئي، أيهما ستصل إلى القمر أولاً؟

تمارين

المكثف بمعدل ثابت 1.20 kV/s . حدد مقدار المجال المغناطيسي بين الألواح عند مسافة $r = 4.00 \text{ cm}$ من المركز.

11.27• يتغير الجهد الكهربائي عبر موصل أسطواني نصف قطره r وطوله L ومقاومته R بمرور الزمن. يتسبب الجهد المتغير بمرور الزمن في تدفق تيار متغير بمرور الزمن. i . في الأسطوانة، وضح أنَّ تيار الإزاحة يساوي $\epsilon_0 \rho di/dt$ ، حيث ρ المقاومة النوعية للموصل.

القسم 11.2

11.28 تبلغ القيمة العظمى للمجال الكهربائي للموجة الكهرومغناطيسية

250 V/m . ما القيمة العظمى للمجال المغناطيسي للموجة الكهرومغناطيسية؟

11.29 حدد المسافة التي يمكن أن يقطعها الضوء في الفراغ بالستينترات خلال 1.00 ns .

11.30 ما الوقت يستغرقه الضوء للانتقال من القمر إلى الأرض؟ من الشمس إلى الأرض؟ من كوكب المشتري إلى الأرض؟

11.31 أجرى عمر مكالمات هاتفية من هاتفه المنزلي في نيويورك إلى شقيقه المقيم في دبي، على بعد حوالي $10,000 \text{ km}$. وتم نقل الإشارة عبر كابل الهاتف. في اليوم التالي، اتصل عمر بشقيقه مرة أخرى من العمل مستخدماً هاتفه الخليوي، وتم نقل الإشارة عبر القمر الصناعي على ارتفاع $36,000 \text{ km}$ فوق سطح الأرض. في منتصف الطريق بين نيويورك وبغداد، قم بتقدير الزمن الذي تستغرقه الإشارات المرسل بواسطة (a) كابل الهاتف و (b) عبر القمر الصناعي للوصول إلى بغداد. بافتراض أن سرعة الإشارة في كلتا الحالتين ماثلة لسرعة الضوء، c . هل سيكون ثمة تأخير ملحوظ في أي من الحالتين؟

11.32• يمكن تحليل المجالات الكهربائية والمغناطيسية في العديد من المواد باستخدام معادلات هذه المجالات في الفراغ، ولكن باستبدال القيم للسماحية والنفاذية.

يشير رقم المسألة الأزرق إلى وجود حل للمسألة في دليل حلول الطالب. تشير علامة النقطة الواحدة • والنقطتين •• إلى زيادة مستوى صعوبة المسألة.

القسم 11.1

11.22 تم توجيه مجال كهربائي مقداره 200.0 V/m بشكل عمودي على سطح مستو دائري نصف قطره 6.00 cm . إذا زاد المجال الكهربائي بمعدل 10.0 V/(m s) ، فحدد مقدار المجال المغناطيسي واتجاهه على مسافة نصف قطرية تبعد عن مركز المنطقة الدائرية بمقدار 10.0 cm .

11.23• سلك نصف قطره 1.00 mm يحمل تياراً قدره 20.0 A . يتم توصيل السلك بمكثف متوازي الألواح يبلغ نصف قطر ألواح الدائرية $R = 4.00 \text{ cm}$ والفواصل بين اللوحات $s = 2.00 \text{ mm}$. ما مقدار المجال المغناطيسي بسبب المجال الكهربائي المتغير عند نقطة تبلغ مسافة نصف قطرها $r = 1.00 \text{ cm}$ من مركز الألواح المتوازية؟ تجاهل تأثيرات الحواف.

11.24• يتناقص التيار المتدفق في ملف لولبي طوله 20.0 cm ونصف قطره 2.00 cm و 500 لفه، يتناقص من 3.00 A إلى 1.00 A في زمن قدره 0.100 s . حدد مقدار المجال الكهربائي المستحث داخل الملف اللولبي على بُعد 1.00 cm سم من مركزه.

11.25 يحتوي مكثف متوازي الألواح على هواء بين ألواح قرصية الشكل نصف قطرها 4.00 mm ومتحدة المحور والمسافة الفاصلة بينها 1.00 mm . تتجمع الشحنة على ألواح المكثف. ما تيار الإزاحة بين الألواح في اللحظة التي يكون فيها معدل تراكم الشحنة على الألواح يساوي $10.0 \text{ } \mu\text{C/s}$ ؟

11.26• يحتوي مكثف متوازي الألواح على ألواح دائرية نصف قطرها 10.0 cm وتبلغ المسافة الفاصلة بينها 5.00 mm . تتم زيادة الجهد عبر

$\epsilon = K\epsilon_0$ و $\mu = K\mu_0$ بقيمهما في الفراغ. حيث K ثابت العزل الكهربائي و K_m النفاذية النسبية للمادة. احسب نسبة سرعة الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ إلى سرعتها في مثل هذه المادة.

القسم 11.3

11.33 يتراوح نطاق الطول الموجي للضوء المرئي في الهواء بين 400 nm و 700 nm (انظر الشكل 11.10). ما نطاق التردد للضوء المرئي؟

11.34 هوائي هاتف خلوي عبارة عن ساق مستقيم بطول 8.0 cm. احسب تردد تشغيل الإشارة من هذا الهاتف. بافتراض أن طول الهوائي يساوي $\frac{1}{4}$ الطول الموجي للإشارة.

11.35• افترض أن دائرة محث ومكثف ومقاوم (RLC) في حالة الرنين تستخدم لإنتاج موجة راديو طولها الموجي 150 m. إذا كانت الدائرة تحتوي على مكثف 2.0 pF، فما معامل للمحث المستخدم؟

11.36• ثلاث محطات إذاعية FM تغطي المنطقة الجغرافية نفسها وتبث على ترددات 91.1 و 91.3 و 91.5 MHz على التوالي. ما الحد الأقصى لعرض الطول الموجي المسموح به لمرشح تمرير النطاق في جهاز الاستقبال في المذياع بحيث يمكن تشغيل محطة FM 91.3 من دون التداخل مع 91.1 FM أو 91.5 FM؟ استخدم $c = 3.00 \times 10^8$ m/s. واحسب الطول الموجي مع وجود نسبة عدم يقين تساوي 1 mm.

القسم 11.4

11.37 يصدر مصدر ضوء نقطي أحادي اللون 1.5 W من الطاقة الكهرومغناطيسية بشكل منتظم في جميع الاتجاهات. أوجد متجه بوينتنج عند نقطة تقع في المواقع التالية:

- (a) على بعد 0.30 m من المصدر
- (b) على بعد 0.32 m من المصدر
- (c) على بعد 1.00 m من المصدر

11.38 فكر في إلكترون في ذرة هيدروجين يبعد 0.050 nm عن البروتون في النواة.

- (a) ما المجال الكهربائي الذي يتعرض له الإلكترون؟
- (b) لإنتاج مجال كهربائي له قيمة فعالة تساوي القيمة فعالة للمجال المذكور في الجزء (a)، ما شدة ضوء الليزر التي يجب توفرها؟

11.39 يستخدم ليزر ثاني أكسيد الكربون بقدرة 3.00 kW في اللحام بالليزر. إذا كان قطر الشعاع يبلغ 1.00 mm، فما القيمة العظمى للمجال الكهربائي في الشعاع؟

11.40 افترض أن الشحنات على هوائي ثنائي القطب تتذبذب ببطء بمعدل 1.00 دورة/ثانية، وأن الهوائي يشع موجات كهرومغناطيسية في منطقة من الفراغ. إذا قاس شخص المجال المغناطيسي المتغير بمرور الزمن في المنطقة ووجد أن الحد الأقصى له يساوي 1.00 mT، ما الحد الأقصى للمجال الكهربائي، E ، في المنطقة. بوحدات الفولت لكل متر؟ ما الزمن الدوري لتذبذب الشحنة؟ ما مقدار متجه بوينتنج؟

11.41 احسب متوسط قيمة متجه بوينتنج، S_{ave} ، لموجة كهرومغناطيسية سعة مجالها الكهربائي 100.

- (a) ما متوسط كثافة الطاقة لهذه الموجة بوحدة J/m³؟
- (b) ما القيمة العظمى للمجال المغناطيسي؟

11.42• يجب أن يكون لشعاع الضوء الأكثر شدة والذي يمكنه الانتشار عبر الهواء الجاف مجالاً كهربائياً لا تتجاوز سعته القصوى له قيمة جهد الانهيار للهواء؛ $E_{\text{max}}^{\text{air}} = 3.0 \times 10^6$ V/m بافتراض أن هذه القيمة لا تتأثر بتردد الموجة.

- (a) احسب القيمة القصوى التي يمكن أن تكون للمجال المغناطيسي لهذه الموجة.
- (b) احسب شدة هذه الموجة.
- (c) ماذا يحدث للموجة الأكثر شدة من هذه؟

11.43•• شعاع ليزر أيون الأرجون ذو موجة مستمرة (cw) له قدرة متوسطة تبلغ 10.0 W وقطر شعاع 1.00 mm. افترض أن شدة الشعاع متساوية عبر المقطع العرضي للشعاع (وهذا غير صحيح، لأن التوزيع الفعلي للشدة يكون عبارة عن دالة جاوسية).

- (a) احسب شدة شعاع الليزر. قارن هذا بمتوسط شدة ضوء الشمس على سطح الأرض (1400 W/m^2).
- (b) أوجد القيمة الفعالة للمجال الكهربائي في شعاع الليزر.

(c) أوجد متوسط قيمة متجه بوينتنج بمرور الزمن.

(d) إذا كان الطول الموجي لشعاع الليزر يساوي 514.5 nm في الفراغ، فاكتب تعبيراً لمتجه بوينتنج اللحظي، حيث يساوي متجه بوينتنج اللحظي صفراً عند $t = 0$ و $x = 0$.

(e) احسب القيمة الفعالة للمجال المغناطيسي في شعاع الليزر.

11.44•• تم تطبيق الجهد، V ، عبر موصل أسطواني نصف قطره r ، وطوله L ، ومقاومته R ، ونتيجة لذلك، فإن التيار، i ، يسري خلال الموصل، ما يؤدي إلى إنشاء مجال مغناطيسي، B . تم وضع الموصل على طول المحور y ، ويسري التيار في الاتجاه y الموجب. افترض أن المجال الكهربائي منتظم عبر الموصل.

(a) أوجد مقدار متجه بوينتنج واتجاهه على سطح الموصل للمجالين الكهروستاتيكي والمغناطيسي.

$$(b) \text{ أثبت أن } \oint \vec{S} \cdot d\vec{A} = I^2 R$$

القسم 11.5

11.45 يصل الإشعاع من الشمس إلى الأرض بمعدل 1.40 kW/m^2 فوق الغلاف الجوي وبمعدل 1.00 kW/m^2 على شاطئ المحيط.

- (a) احسب القيم القصوى لكل من E و B فوق الغلاف الجوي.
- (b) أوجد القوة والضغط اللذين يبذلها الإشعاع على شخص مستقل على الشاطئ وتبلغ مساحته 0.750 m^2 أثناء تعرضه للشمس.

11.46 اقترح العلماء استخدام الضغط الإشعاعي لأشعة الشمس للسفر إلى الكواكب الأخرى في النظام الشمسي. إذا كانت شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي الناتج من الشمس حوالي 1.40 kW/m^2 بالقرب من الأرض، فما حجم الشراع اللازم لتسريع مركبة فضائية كتلتها 10.0 أطنان مترية بعجلة مقدارها 1.00 m/s^2 ؟

- (a) افترض أن الشراع يمتص كل الإشعاع الساقط.
- (b) افترض أن الشراع يعكس تمامًا كل الإشعاع الساقط.

11.47 الشراع الشمسي عبارة عن دائرة عملاقة (نصف قطرها $R = 10.0 \text{ km}$) مصنوعة من مادة تعكس الإشعاع بالكامل من جانب واحد وتمتص الإشعاع بالكامل من الجانب الآخر. في الفضاء السحيق، بعيداً عن مصادر الضوء الأخرى، ستوفر الخلفية الكونية من الموجات متناهية الصغر المصدر الأساسي للإشعاع الساقط على الشراع. بافتراض أن هذا الإشعاع صادر عن جسم أسود مثالي عند $T = 2.725 \text{ K}$ ، احسب القوة المحصلة على الشراع بسبب انعكاسها وامتصاصها. افترض أيضاً أن أي حرارة تنتقل إلى الشراع يتم نقلها بعيداً، وأن الفوتونات تسقط عمودياً على سطح الشراع.

11.48• رائد فضاء في وضع السكون في الفضاء الخارجي، أحدهما على بعد 20.0 m من مكوك فضائي والآخر على بعد 40.0 m من المكوك. باستخدام ليزر بقدرة 100.0 W، قرر رائد الفضاء الذي يبعد 40.0 m عن المكوك دفع رائد الفضاء الآخر في اتجاه المكوك الفضائي. ركز الليزر على قطعة من النسيج العاكس تمامًا على البذلة الفضائية لرائد الفضاء الآخر. إذا كان إجمالي كتلته مع المعدات 100.0 kg، فكم سيستغرق من الوقت للوصول إلى مكوك الفضاء؟

11.49• تم توجيه شعاع ليزر ينتج بقعة ضوء قطرها 1.00 mm بشكل عمودي على مركز لوح رقيق ودائري من الألمنيوم العاكس تمامًا (قطره 2.00 mm) والمثبت رأسياً على قطعة مسطحة من الفلين تطفو على سطح الماء في كأس كبيرة. تبلغ كتلة هذا "المركب الشراعي" 0.100 g. ويتحرك مسافة قدرها 2.00 mm في زمن قدره 63.0 s. بافتراض أن قدرة الليزر ثابتة في المنطقة التي يقع فيها المركب الشراعي أثناء حركته، ما قدرة الليزر؟ (تجاهل مقاومة الهواء ولزوجة الماء).

11.50• جسيم صغير كثافته 2000 kg/m^3 على المسافة نفسها من الشمس مثل الأرض وتبلغ $(1.50 \times 10^{11} \text{ m})$. افترض أن الجسيم كروي وعاكس بشكل مثالي. كم يجب أن يبلغ نصف قطره ليصل ضغط الإشعاع الخارجي عليه إلى 1.00% من جاذبية الشمس الداخلية؟ (افتراض أن كتلة الشمس تساوي $2.00 \times 10^{30} \text{ kg}$).

11.51• هلام هوائي من السليكا، عبارة عن مادة مسامية للغاية وعازلة حرارياً مصنوعة من السليكا، وتبلغ كثافتها 1.00 mg/cm^3 . شريحة دائرية رقيقة من الهلام يبلغ قطرها 2.00 mm وسيكها 0.10 mm.

- (a) ما وزن شريحة الهلام (باليوتون)؟
- (b) ما شدة الإشعاع وضغطه من شعاع ليزر بقدرة 5.00 mW وقطر 2.00 mm على العينة؟
- (c) ما عدد أشعة الليزر بقدرة 5.00 mW وقطر 2.00 mm اللازمة لجعل الشريحة تطفو في مجال الجاذبية الأرضية؟ استخدم $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

القسم 11.6

11.63 يوفر كشاف بقوة 300 W ذي إضاءة مركزة نسبة 40% من الضوء الصادر عنه داخل منطقة دائرية قطرها 2 m. ما القيمة الفعالة للمجال الكهربائي في المنطقة المضاءة؟

11.64 ما سعة المجال الكهربائي للموجة الكهرومغناطيسية التي تبلغ سعة مجالها المغناطيسي $5.00 \times 10^{-3} \text{ T}$ ؟

11.65 ما المسافة بين العقد الموجية الناتجة من تداخل موجات الميكروويف المتتالية في تجويف فرن ميكروويف؟ يعمل فرن الميكروويف عادة بتردد 2.4 GHz

11.66 يبلغ الثابت الشمسي المقيس بواسطة الأقمار الصناعية الأرضية 1400 W/m^2 تقريباً.

(a) أوجد أقصى مجال كهربائي للإشعاع الكهرومغناطيسي الصادر عن الشمس.

(b) أوجد أقصى مجال مغناطيسي لهذه الموجات الكهرومغناطيسية.

11.67 تبلغ القيمة العظمى لمجال كهربائي على مسافة 2.25 m من مصباح كهربائي 21.2 V/m

(a) ما القيمة العظمى للمجال المغناطيسي في تلك النقطة؟

(b) ما القدرة الناتجة للمصباح؟

11.68 إذا كانت القيمة العظمى للمجال الكهربائي الناجم عن نجم يبلغ نصف قطره ضعف نصف قطر الشمس تساوي 44.0 V/m على مسافة 15 AU. فما درجة حرارته؟ تعامل مع النجم باعتباره جسماً أسود.

11.69 مؤشر ليزر بقوة 5.00 mW يبلغ قطر شعاعه 2.00 mm

(a) ما القيمة الفعالة للمجال الكهربائي لشعاع الليزر هذا؟

(b) احسب الطاقة الكهرومغناطيسية الكلية في 1.00 m من شعاع الليزر هذا.

11.70 توفر الشمس على سطح الأرض، ما يقدر بـ 1.00 kW/m^2 من الطاقة. لنفترض أن أشعة الشمس تسقط على سقف مساحته 10.0 m في 30.0 m بزاوية 90.0° .

(a) قُدّر الطاقة الكلية الساقطة على السطح.

(b) أوجد ضغط الإشعاع على السطح.

11.71 تملك منشأة الإشعاع الوطنية أقوى ليزر في العالم؛ ويستخدم 192 حزمة لتسديد 500 TW من الطاقة على قبة كروية قطرها 2.00 mm. ما مدى تسارع الحبة الكروية التي كثافتها 2.00 g/cm^3 إذا اصطدم بها شعاع ليزر واحد فقط لمدة 1.00 ns وتم امتصاص 2.00% من الضوء؟

11.72 يتكون مقاوم من أسطوانة صلبة نصف قطرها r وطولها L . وللمقاوم مقاومة R ويحمل تياراً i . استخدم متجه بوينتنج لحساب الطاقة التي يتم إشعاعها من سطح المقاوم.

11.73 يرسل برج الراديو قدرة مقدارها 30.0 kW بالتساوي في جميع الاتجاهات. افترض أن موجات الراديو التي تضرب الأرض تنعكس.

(a) ما مقدار متجه بوينتنج على مسافة 12.0 km من البرج؟

(b) ما القيمة الفعالة للفرق الجهد الكهربائي المبدولة على الإلكترون في هذا الموقع؟

11.74 تنص نظرية الكم على أن الموجات الكهرومغناطيسية تتكون في الواقع من كمات منفصلة - الفوتونات - لكل منها طاقة $E = \hbar\omega$ حيث $\hbar = 1.054572 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ هو ثابت بلانك المخفض و ω هو التردد الزاوي للموجة.

(a) أوجد كمية حركة الفوتون.

(b) أوجد مقدار كمية الحركة الزاوية للفوتون. الفوتونات مستقطبة دائرياً؛ أي أنها تُحدّد من خلال تراكب موجتين مستقطبتين مستويتين لهما سعة مجال متساويتان وترددان متساويان واستقطابان متعامدان. بمقدار ربع دورة (90° أو $\pi/2 \text{ rad}$) خارج الطور. ومن ثمّ فإنّ متجهي المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي في أي نقطة ثابتة يدوران في دائرة بالتدور الزاوي نفسه مثل الموجات. يمكن إثبات أن الموجة المستقطبة دائرياً التي طاقتها U وتردها الزاوي ω لها كمية حركة زاوية مقدارها $L = U/\omega$. (يتم تحديدها اتجاه كمية الحركة الزاوية عن طريق إبهام اليد اليمنى. عندما يتم قبض الأصابع في الاتجاه الذي تدور فيه متجهات المجال).

(c) نسبة كمية الحركة الزاوية للجسيم إلى \hbar هي عدده الكمي المغزلي. حدد عدد الكم المغزلي للفوتون.

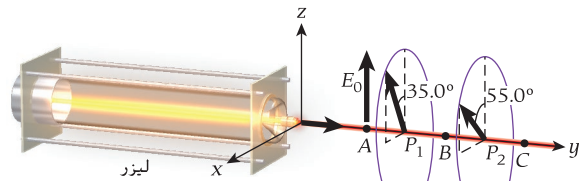
11.75 يعمل ميكروويف بقوة 250 W إذا افترضنا أن الموجات التي تخرج من مصدر نقطي باعث على جانب واحد من القرن. فكم يستغرق انصهار مكعب من

11.52 مرشحاً استقطاب الأول يميل بزاوية استقطاب 15.0° و الثاني بزاوية 30.0° . إذا مرّ ضوء شدته 1.00 W/m^2 عبر المرشحين، فما شدة الضوء النافذ؟

11.53 يمر شعاع ليزر مستقطب رأسياً تبلغ شدته 10.0 mW/m^2 عبر مرشح استقطاب زاوية استقطابه 30.0° من المستوى الأفقي. ما شدة شعاع الليزر لدى خروجه من مرشح الاستقطاب؟

11.54 سقط ضوء غير مستقطب شدته I_0 على مجموعة من خمسة مرشحات استقطاب تم تدوير اتجاه استقطاب كل منها بمقدار 10.0° عن اتجاه استقطاب المرشح السابق. ما النسبة من الضوء الساقط الذي سيمر عبر السلسلة؟

11.55 ينتج ليزر ضوءاً مستقطباً في الاتجاه العمودي. ينتقل الضوء في الاتجاه y الموجب ويمر عبر مرشحي استقطاب. بزاويتي استقطاب 35.0° و 55.0° درجة من الاتجاه العمودي. كما هو موضح في الشكل. تتم موازاة شعاع ليزر (بحيث لا يتقارب أو يتوسع). وله مقطع عرضي دائري قطره 1.00 mm. وقدرته المتوسطة تبلغ 15.0 mW عند النقطة A. عند النقطة C. ما القيمة القصوى للمجال الكهربائي والمجال المغناطيسي، وما شدة ضوء الليزر؟



تمارين إضافية

11.56 يستغرق شعاع الليزر 50.0 ms لينعكس مرة أخرى من شراع عاكس تماماً على مركبة فضائية. كم يبعد الشراع؟

11.57 بيت ذو سقف مواجه للجنوب وعلى سطحه ألواح شمسية. تتمتع الألواح الكهروضوئية بكفاءة بنسبة 10.0% وتشغل مساحة أبعادها 3.00 m في 8.00 m. يبلغ متوسط معدل الإشعاع الشمسي الساقط على الألواح 300 W/m^2 .

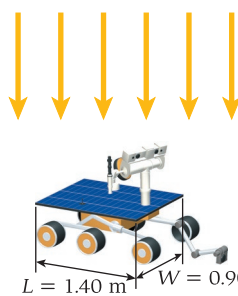
كم متوسط على مدار جميع الظروف لمدة عام. كم كيلووات ساعة من الكهرباء ستولد الألواح الشمسية في شهر مكون من 30 يوماً؟

11.58 ما ضغط الإشعاع الناجم عن نجم يد الجوزاء (الذي يصل لمعانه أو الطاقة المشعة له إلى 10,000 ضعف خرج طاقة الشمس) على مسافة منه تساوي مسافة مدار أورانوس من الشمس؟

11.59 ينتج ليزر قدرته 200 W شعاعاً بمساحة مقطع عرضي تبلغ 1.00 mm^2 وطول موجة يبلغ 628 m. ما القيمة العظمى للمجال الكهربائي في الشعاع؟

11.60 ما الطول الموجي للموجات الكهرومغناطيسية المستخدمة في اتصالات الهاتف الخليوي بتردد 848.97 MHz؟

11.61 كما هو موضح في الشكل، فإن ضوء الشمس يسقط إلى أسفل مباشرة (في اتجاه z السالب) على لوح شمسي (حلوله $L = 1.40 \text{ m}$ وعرضه $W = 0.900 \text{ m}$)

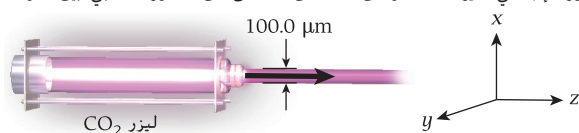


على مركبة فضائية Spirit على كوكب المريخ. تبلغ القيمة العظمى المجال الكهربائي في الإشعاع الشمسي 673 V/m وهو منتظم (الإشعاع له السعة نفسها في كل مكان).

إذا استطاعت الألواح الشمسية تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية بكفاءة تبلغ 18.0%. فكم كمية الطاقة المتوسطة التي يمكن أن ينتجها اللوح؟

11.62 تم توصيل مكثف سعته $14.9 \mu\text{F}$ ومقاومة $24.3 \text{ k}\Omega$ ومفتاح وبطارية جهدها 25.0 V على التوالي. ما معدل تغير المجال الكهربائي بين ألواح المكثف عند $t = 0.3621 \text{ s}$ بعد إغلاق المفتاح؟ تبلغ مساحة الألواح 1.00 cm^2 .

اتجاه المحور Z الموجب، وتمت موازاته (بحيث لا يتباعد ولا يتقارب) بقطر ثابت قدره $100.0 \mu\text{m}$ اكتب معادلات المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي لضوء الليزر في صورة دالة للزمن وللموضع Z على طول الخزمة. تذكر أن \vec{E} و \vec{B} متجهان. اترك الطور الإجمالي غير محدد، ولكن تأكد من التحقق من الطور النسبي بين \vec{E} و \vec{B}



الثلج يوجد على مسافة 2.00 cm من جانب يبعد 10.0 cm عن الباعث إذا كان المكعب يمتص 10.0% من الفوتونات التي تصطدم به؟ كم عدد الفوتونات التي يبلغ طولها الموجي 10.0 cm تصطدم بمكعب الثلج في الثانية الواحدة؟ افترض أن كثافة المكعب 0.960 g/cm^3 .

• **11.76** ينتج ليزر ثاني أكسيد الكربون الصناعي حزمة من الإشعاع بمتوسط قدرة يبلغ 6.00 kW بطول موجي يبلغ $10.6 \mu\text{m}$. يمكن استخدام مثل هذا الليزر لقطع فولاذ يصل سمكه إلى 25 mm . تم استقطاب ضوء الليزر في اتجاه x ، ويتحرك في

تمارين بمعطيات متعددة

تبلغ زاوية مرشح الاستقطاب الأول 28.1° بالنسبة إلى المستوى الأفقي، وتبلغ زاوية استقطاب الثاني 88.6° بأي نسبة يتم خفض شدة أشعة الشمس الساقطة بواسطة مرشحي الاستقطاب؟

11.82 لفحص البقع الشمسية بصرياً من خلال تلسكوب، يتعين على علماء الفلك تقليل شدة ضوء الشمس لتجنب إلحاق الضرر بشبكية العين. ويتوصلون إلى هذا القدر من خفض الشدة عن طريق تركيب مرشحي استقطاب على التلسكوب. تبلغ زاوية مرشح الاستقطاب الأول 38.3° بالنسبة إلى المستوى الأفقي. إذا أراد علماء الفلك تقليل شدة ضوء الشمس بمعامل 0.7584 ، فما زاوية الاستقطاب اللازمة لمرشح الاستقطاب الثاني بالنسبة إلى المستوى الأفقي؟ افترض أن هذه الزاوية أكبر من زاوية مرشح الاستقطاب الأول.

11.83 لفحص البقع الشمسية بصرياً من خلال تلسكوب، يتعين على علماء الفلك تقليل شدة ضوء الشمس لتجنب إلحاق الضرر بشبكية العين. ويتوصلون إلى هذا القدر من خفض الشدة عن طريق تركيب مرشحي استقطاب خطيين على التلسكوب. تبلغ زاوية استقطاب مرشح الاستقطاب الثاني 110.6° بالنسبة إلى المستوى الأفقي. إذا أراد علماء الفلك تقليل شدة ضوء الشمس بمعامل 0.7645 ، فما زاوية الاستقطاب اللازمة لمرشح الاستقطاب الأول بالنسبة إلى المستوى الأفقي؟ افترض أن هذه الزاوية أصغر من زاوية مرشح الاستقطاب الثاني.

11.77 أثناء اختبار مصباح كهربائي جديد، تم وضع جهاز استشعار على بعد 11.9 cm من المصباح. يسجل جهاز الاستشعار شدة قدرها 182.9 W/m^2 للإشعاع المنبعث من المصباح. ما القيمة الفعالة للمجال الكهربائي في موقع جهاز الاستشعار؟

11.78 أثناء اختبار مصباح كهربائي جديد، تم وضع جهاز استشعار على بعد 42.1 cm من المصباح. يسجل جهاز الاستشعار شدة قدرها 191.4 W/m^2 للإشعاع المنبعث من المصباح. ما القيمة الفعالة للمجال المغناطيسي في موقع جهاز الاستشعار؟

11.79 أثناء اختبار مصباح كهربائي جديد، تم وضع جهاز استشعار على بعد 52.5 cm من المصباح. يسجل جهاز الاستشعار قيمة فعالة تبلغ $9.142 \times 10^{-7} \text{ T}$ للمجال المغناطيسي للإشعاع المنبعث من المصباح. ما شدة هذا الإشعاع في موقع جهاز الاستشعار؟

11.80 أثناء اختبار مصباح كهربائي جديد، تم وضع جهاز استشعار على بعد 17.7 cm من المصباح. يسجل جهاز الاستشعار قيمة فعالة تبلغ 279.9 V/m للمجال الكهربائي للإشعاع المنبعث من المصباح. ما شدة هذا الإشعاع في موقع جهاز الاستشعار؟

11.81 لفحص البقع الشمسية بصرياً من خلال تلسكوب، يتعين على علماء الفلك تقليل شدة ضوء الشمس لتجنب إلحاق الضرر بشبكية العين. ويتوصلون إلى هذا القدر من خفض الشدة عن طريق تركيب مرشحي استقطاب على التلسكوب.

الملحق A

تمهيد الرياضيات

1. الجبر
 - 1.1 الأساسيات
 - 1.2 الأسس
 - 1.3 اللوغاريتمات
 - 1.4 المعادلات الخطية
2. الهندسة
 - 2.1 الأشكال الهندسية في بُعدين
 - 2.2 الأشكال الهندسية في ثلاثة أبعاد
3. حساب المثلثات
 - 3.1 المثلثات قائمة الزاوية
 - 3.2 المثلثات العامة
4. حساب التفاضل والتكامل
 - 4.1 المشتقات
 - 4.2 التكاملات
5. الأعداد المركبة
 - مثال A.1 مجموعة ماندلبرو

الرمز:

تمثل الحروف a و b و c و x و y أعدادًا حقيقية.

يمثل الحرف n أعدادًا صحيحة.

تمثل الحروف اليونانية α و β و γ الزوايا المقاسة بالراديان

1. الجبر

1.1 الأساسيات

المعاملات:

$$(A.1) \quad ax + bx + cx = (a + b + c)x$$

$$(A.2) \quad (a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$$

$$(A.3) \quad (a - b)^2 = a^2 - 2ab + b^2$$

$$(A.4) \quad (a + b)(a - b) = a^2 - b^2$$

المعادلة التربيعية:
إنَّ المعادلة التي بالصيغة

$$(A.5) \quad ax^2 + bx + c = 0$$

بالنسبة إلى قيم a و b و c المحددة، يكون لها حلان:

$$x = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$(A.6)$$

$$x = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

و

يُطلق على حلّي المعادلة التربيعية جذور. وتكون الجذور أعدادًا حقيقية إذا كانت $b^2 \geq 4ac$.

1.2 الأسس

إذا كان a عددًا، فإن a^n هو ناتج ضرب a في نفسه عدد n من المرات:

$$(A.7) \quad a^n = \underbrace{a \times a \times a \times \cdots \times a}_{n \text{ معاملات}}$$

ويُسمى العدد n الأس. ومع ذلك، لا يلزم أن يكون الأس عددًا موجبًا أو عددًا صحيحًا، فأي عدد حقيقي x يمكن أن يُستخدم كأس.

$$(A.8) \quad a^{-x} = \frac{1}{a^x}$$

$$(A.9) \quad a^0 = 1$$

$$(A.10) \quad a^1 = a$$

الجدور:

$$(A.11) \quad a^{1/2} = \sqrt{a}$$

$$(A.12) \quad a^{1/n} = \sqrt[n]{a}$$

الضرب والقسمة:

$$(A.13) \quad a^x a^y = a^{x+y}$$

$$(A.14) \quad \frac{a^x}{a^y} = a^{x-y}$$

$$(A.15) \quad (a^x)^y = a^{xy}$$

1.3 اللوغاريتمات

اللوغاريتم هو الدالة العكسية للدالة الأسية:

$$(A.16) \quad y = a^x \Leftrightarrow x = \log_a y$$

يشير الرمز $\log_a y$ إلى لوغاريتم y للأساس a . ونظرًا لأن الدالتين الأسية واللوغاريتمية كل منهما معكوس للأخرى، يمكننا كذلك كتابة هذه المتطابقة:

$$(A.17) \quad x = \log_a (a^x) = a^{\log_a x} \quad (\text{لأي أساس } a)$$

الأساسان الأكثر استخدامًا هما الأساس 10، أساس اللوغاريتم العشري، والأساس e ، أساس اللوغاريتم الطبيعي. القيمة العددية للأساس e

$$(A.18) \quad e = 2.718281828 \dots$$

الأساس 10:

$$(A.19) \quad y = 10^x \Leftrightarrow x = \log_{10} y$$

الأساس e :

$$(A.20) \quad y = e^x \Leftrightarrow x = \ln y$$

يتبع هذا الكتاب قاعدة استخدام \ln للإشارة إلى لوغاريتم الأساس e . تأتي قواعد الحساب باستخدام اللوغاريتمات من القواعد الخاصة بالأسس:

$$(A.21) \quad \log(ab) = \log a + \log b$$

$$(A.22) \quad \log\left(\frac{a}{b}\right) = \log a - \log b$$

$$(A.23) \quad \log(a^x) = x \log a$$

$$(A.24) \quad \log 1 = 0$$

ونظرًا لأن هذه القواعد صالحة لأي أساس، فقد حذف الرمز السفلي الذي يشير إلى الأساس.

1.4 المعادلات الخطية

تتمثل الصيغة العامة للمعادلة الخطية في

$$(A.25) \quad y = ax + b$$

حيث a و b ثابتان. ويكون التمثيل البياني لـ y مقابل x عبارة عن خط مستقيم؛ ويكون ميل هذا الخط b هو المقطع y . انظر الشكل A.1. يمكن حساب ميل الخط المستقيم بالتعويض بقيمتين مختلفتين x_1 و x_2 في المعادلة الخطية ثم حساب القيم الناتجة y_1 و y_2 :

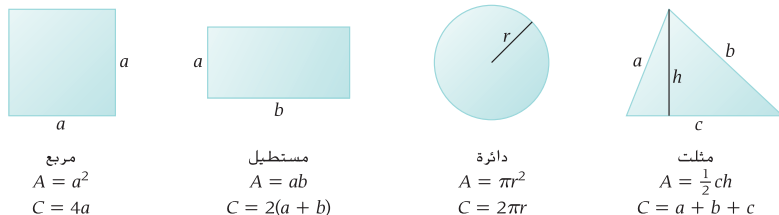
$$(A.26) \quad a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

إذا كان $a = 0$ ، فسيكون الخط المستقيم أفقيًا؛ وإذا كان $a > 0$ ، فسيرتفع الخط المستقيم مع زيادة قيمة x . كما هو موضح في المثال الخاص بالشكل A.1؛ وإذا كان $a < 0$ ، فسينخفض الخط المستقيم مع زيادة قيمة x .

2. الهندسة

2.1 الأشكال الهندسية في بُعدين

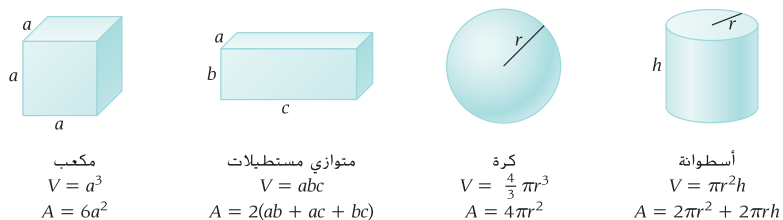
يعرض الشكل A.2 المساحة، A ، وطول المحيط، C ، لأشكال هندسية شائعة ثنائية الأبعاد.



الشكل A.2 المساحة، A ، وطول المحيط، C ، للمربع والمستطيل والدائرة والمثلث.

2.2 الأشكال الهندسية في ثلاثة أبعاد

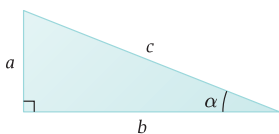
يعرض الشكل A.3 الحجم، V ، ومساحة السطح، A ، لأشكال هندسية شائعة ثلاثية الأبعاد.



الشكل A.3 الحجم، V ، ومساحة السطح، A ، للمكعب ومتوازي المستطيلات والكرة والأسطوانة.

3. حساب المثلثات

من المهم ملاحظة أنه يلزم قياس جميع الزوايا بالراديان لكي تسري عليها الأمور التالية.



الشكل A.4 تحديد أطوال الأضلاع a و b و c والزوايا للمثلث قائم الزاوية.

3.1 المثلثات قائمة الزاوية

المثلث قائم الزاوية هو مثلث إحدى زواياه الثلاثة قائمة، أي زاوية تساوي 90° بالتحديد ($\pi/2$ rad) (بشار إليها بعلامة الزاوية الصغيرة في الشكل A.4)، وتر المثلث هو الضلع المقابل للزاوية 90° ، ويرمز الحرف c عادةً إلى وتر المثلث. نظرية فيثاغورس:

$$(A.27) \quad a^2 + b^2 = c^2$$

الدوال المثلثية (انظر الشكل A.5):

$$(A.28) \quad \sin \alpha = \frac{a}{c} = \frac{\text{المقابل}}{\text{الوتر}}$$

$$(A.29) \quad \cos \alpha = \frac{b}{c} = \frac{\text{المجاور}}{\text{الوتر}}$$

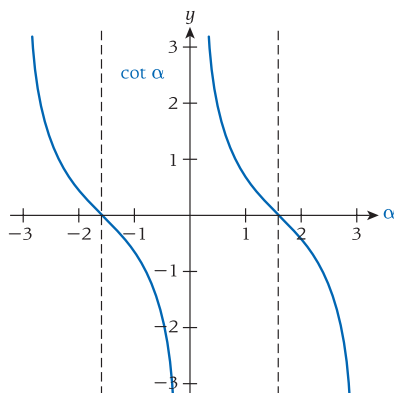
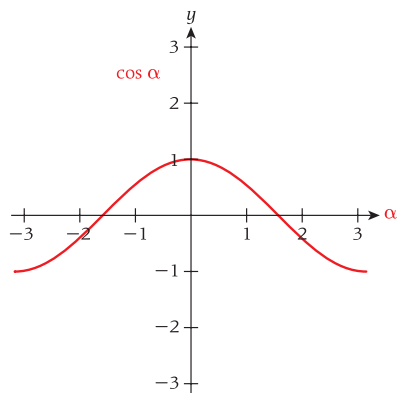
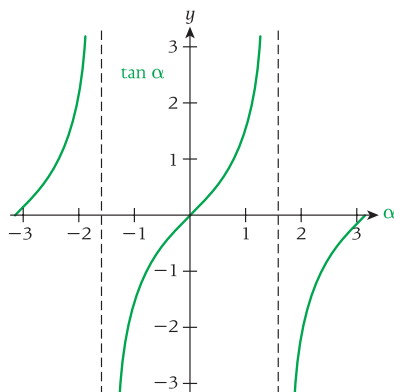
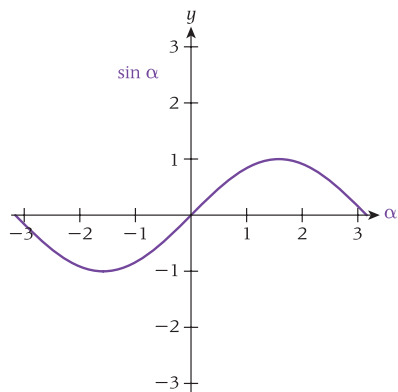
$$(A.30) \quad \tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{a}{b}$$

$$(A.31) \quad \cot \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{1}{\tan \alpha} = \frac{b}{a}$$

$$(A.32) \quad \sin^{-1} \frac{a}{c} = \arcsin \frac{a}{c} = \alpha$$

$$(A.33) \quad \cos^{-1} \frac{b}{c} = \arccos \frac{b}{c} = \alpha$$

الدوال المثلثية العكسية (استخدمت الرموز \sin^{-1} و \cos^{-1} إلخ. في هذا الكتاب):



الشكل A.5 الدوال المثلثية \sin و \cos و \tan و \cot .

$$(A.34) \quad \sin^{-1} \frac{a}{c} = \arcsin \frac{a}{c} = \alpha$$

$$(A.35) \quad \cos^{-1} \frac{b}{c} = \arccos \frac{b}{c} = \alpha$$

$$(A.36) \quad \tan^{-1} \frac{a}{b} = \arctan \frac{a}{b} = \alpha$$

$$(A.37) \quad \cot^{-1} \frac{b}{a} = \operatorname{arccot} \frac{b}{a} = \alpha$$

$$(A.38) \quad \csc^{-1} \frac{c}{a} = \operatorname{arccsc} \frac{c}{a} = \alpha$$

$$(A.39) \quad \sec^{-1} \frac{c}{b} = \operatorname{arcsec} \frac{c}{b} = \alpha$$

جميع الدوال المثلثية دورية:

$$(A.40) \quad \sin(\alpha + 2\pi) = \sin \alpha$$

$$(A.41) \quad \cos(\alpha + 2\pi) = \cos \alpha$$

$$(A.42) \quad \tan(\alpha + \pi) = \tan \alpha$$

$$(A.43) \quad \cot(\alpha + \pi) = \cot \alpha$$

العلاقات الأخرى بين الدوال المثلثية:

$$(A.44) \quad \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$

$$(A.45) \quad \sin(-\alpha) = -\sin \alpha$$

$$(A.46) \quad \cos(-\alpha) = \cos \alpha$$

$$(A.47) \quad \sin(\alpha \pm \pi/2) = \pm \cos \alpha$$

$$(A.48) \quad \sin(\alpha \pm \pi) = -\sin \alpha$$

$$(A.49) \quad \cos(\alpha \pm \pi/2) = \mp \sin \alpha$$

$$(A.50) \quad \cos(\alpha \pm \pi) = -\cos \alpha$$

صيغ الجمع:

$$(A.51) \quad \sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

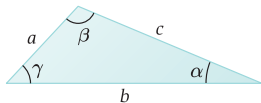
$$(A.52) \quad \cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$$

تقريب الزوايا الصغيرة:

$$(A.53) \quad \sin \alpha \approx \alpha - \frac{1}{6} \alpha^3 + \dots \quad (|\alpha| \ll 1)$$

$$(A.54) \quad \cos \alpha \approx 1 - \frac{1}{2} \alpha^2 + \dots \quad (|\alpha| \ll 1)$$

بالنسبة إلى الزوايا الصغيرة حيث $|\alpha| \ll 1$. يكون من المقبول غالبًا استخدام تقريبات الزوايا الصغيرة $\sin \alpha = \tan \alpha = \alpha$ و $\cos \alpha = 1$.



الشكل A.6 تحديد أضلاع وزوايا المثلث العام.

3.2 المثلثات العامة

مجموع زوايا المثلث الثلاثة يساوي π rad (انظر الشكل A.6):

$$(A.55) \quad \alpha + \beta + \gamma = \pi$$

قانون cosine:

$$(A.56) \quad c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$$

(هذا تعميم لنظرية فيثاغورس في الحالة التي لا تكون فيها قيمة الزاوية γ تساوي 90° أو $\pi/2$ rads).
قانون sine:

$$(A.57) \quad \frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c}$$

4. حساب التفاضل والتكامل

4.1 المشتقات

كثيرات الحدود:

$$(A.58) \quad \frac{d}{dx} x^n = nx^{n-1}$$

الدوال المثلثية:

$$(A.59) \quad \frac{d}{dx} \sin(ax) = a \cos(ax)$$

$$(A.60) \quad \frac{d}{dx} \cos(ax) = -a \sin(ax)$$

$$(A.61) \quad \frac{d}{dx} \tan(ax) = \frac{a}{\cos^2(ax)}$$

$$(A.62) \quad \frac{d}{dx} \cot(ax) = -\frac{a}{\sin^2(ax)}$$

الأسس واللوغاريتمات:

$$(A.63) \quad \frac{d}{dx} e^{ax} = ae^{ax}$$

$$(A.64) \quad \frac{d}{dx} \ln(ax) = \frac{1}{x}$$

$$(A.65) \quad \frac{d}{dx} a^x = a^x \ln a$$

قاعدة ناتج الضرب:

$$(A.66) \quad \frac{d}{dx} (f(x)g(x)) = \left(\frac{df(x)}{dx} \right) g(x) + f(x) \left(\frac{dg(x)}{dx} \right)$$

قاعدة السلسلة:

$$(A.67) \quad \frac{dy}{dx} = \frac{dy}{du} \frac{du}{dx}$$

4.2 التكاملات

جميع التكاملات غير المحددة ثابت تكامل، C .
كثيرات الحدود:

$$(A.68) \quad \int x^n dx = \frac{1}{n+1} x^{n+1} + C \quad (n \neq -1)$$

$$(A.69) \quad \int x^{-1} dx = \ln|x| + C$$

$$(A.70) \quad \int \frac{1}{a^2 + x^2} dx = \frac{1}{a} \tan^{-1} \frac{x}{a} + C$$

$$(A.71) \quad \int \frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}} dx = \ln \left| x + \sqrt{a^2 + x^2} \right| + c$$

$$(A.72) \quad \int \frac{1}{\sqrt{a^2 - x^2}} dx = \sin^{-1} \frac{x}{|a|} + c = \tan^{-1} \frac{x}{\sqrt{a^2 - x^2}} + c$$

$$(A.73) \quad \int \frac{1}{(a^2 + x^2)^{3/2}} dx = \frac{1}{a^2} \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} + c$$

$$(A.74) \quad \int \frac{x}{(a^2 + x^2)^{3/2}} dx = -\frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}} + c$$

الدوال المثلثية:

$$(A.75) \quad \int \sin(ax) dx = -\frac{1}{a} \cos(ax) + c$$

$$(A.76) \quad \int \cos(ax) dx = \frac{1}{a} \sin(ax) + c$$

الأسس:

$$(A.77) \quad \int e^{ax} dx = \frac{1}{a} e^{ax} + c$$

5. الأعداد المركبة

نحن جميعًا نعلم الأعداد الحقيقية التي يمكن فرزها على طول خط الأعداد بترتيب قيمة متزايدة، من $-\infty$ إلى $+\infty$. ندرج الأعداد الحقيقية ضمن مجموعة أعداد أكبر بكثير تُسمى **الأعداد المركبة**. ونحدد الأعداد المركبة بدلالة أجزائها الحقيقية وأجزائها التخيلية. ويتمثل حيز الأعداد المركبة في مستوى تشكل فيه الأجزاء الحقيقية محورًا، يُسمى $\Re(z)$ في الشكل A.7. وتشكل الأجزاء التخيلية محورًا آخر، يُسمى $\Im(z)$ في الشكل A.7. (من المعتاد استخدام حرفي الألمانيتين القديمة \Re و \Im لتمثيل الأجزاء الحقيقية والتخيلية للأعداد المركبة). يُحدد العدد المركب z بدلالة جزئه الحقيقي، x وجزئه التخيلي، y وثابت أولير، i :

$$(A.78) \quad z = x + iy$$

ويحدد ثابت أولير كما يلي:

$$(A.79) \quad i^2 = -1$$

ويعتبر كل من الجزء الحقيقي، $x = \Re(z)$ ، والجزء التخيلي، $y = \Im(z)$ ، للعدد المركب عددًا حقيقيًا. ويتم جمع الأعداد المركبة وطرحها وضربها وقسمتها بطريقة تماثل العمليات نفسها على الأعداد الحقيقية، حيث $i^2 = -1$:

$$(A.80) \quad (a + ib) + (c + id) = (a + c) + i(b + d)$$

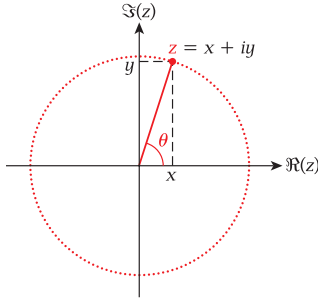
$$(A.81) \quad (a + ib) - (c + id) = (a - c) + i(b - d)$$

$$(A.82) \quad (a + ib)(c + id) = (ac - bd) + i(ad + bc)$$

$$(A.83) \quad \frac{a + ib}{c + id} = \frac{(ac + bd) + i(bc - ad)}{c^2 + d^2}$$

لكل عدد مركب z ، يوجد مرافق مركب z^* يتكون من الجزء الحقيقي نفسه، لكن الجزء التخيلي يكون مختلف الإشارة:

$$(A.84) \quad z = x + iy \Leftrightarrow z^* = x - iy$$



الشكل A.7 المستوى المركب. يتشكل المحور الأفقي من الأجزاء الحقيقية للأعداد المركبة والمحور الرأس من الأجزاء التخيلية.

يمكننا التعبير عن الجزأين الحقيقي والتخيلي للعدد المركب بدلالة العدد ومرافقه المركب:

$$(A.85) \quad \Re(z) = \frac{1}{2}(z + z^*)$$

$$(A.86) \quad \Im(z) = \frac{1}{2}i(z - z^*)$$

كما هو الحال مع المتجه ثنائي الأبعاد، يكون للعدد المركب $z = x + iy$ المقدار $|z|$ إلى جانب الزاوية θ مع المحور الأفقي للمستوى المركب، كما موضح في الشكل A.7:

$$(A.87) \quad |z|^2 = zz^*$$

$$(A.88) \quad \theta = \tan^{-1} \frac{\Im(z)}{\Re(z)} = \tan^{-1} \frac{i(z - z^*)}{(z + z^*)}$$

وبذلك يمكننا كتابة العدد المركب $z = x + iy$ بدلالة المقدار و"زاوية الطور":

$$(A.89) \quad z = |z|(\cos \theta + i \sin \theta)$$

ثمة متطابقة مثيرة وأكثر نفعا تتمثل في صيغة أويلر:

$$(A.90) \quad e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$$

فباستخدام هذه المتطابقة، يمكننا صياغة ما يلي، لأي عدد مركب، z .

$$(A.91) \quad z = |z|e^{i\theta}$$

ومن ثم يمكننا رفع العدد المركب z إلى أي قوة n :

$$(A.92) \quad z^n = |z|^n e^{in\theta}$$

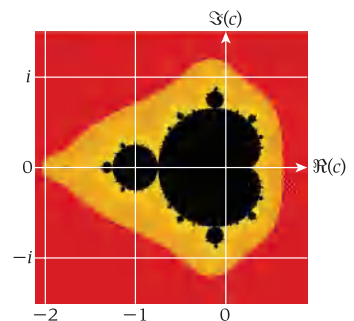
مجموعة ماندلبرو

مثال A.1

يمكننا الاستفادة عمليًا بشكل جيد من معرفتنا بالأعداد المركبة وضربها من خلال دراسة مجموعة ماندلبرو وهي مجموعة مكونة من جميع النقاط c في المستوى المركب والتي لا تؤول فيها متسلسلة التكرارات

$$z_{n+1} = z_n^2 + c \quad \text{حيث } z_0 = c$$

إلى ما لا نهاية، أي تبقى $|z_n|$ منتهية لكل التكرارات. تبدو قاعدة التكرار هذه بسيطة، فعلى سبيل المثال، نرى أن أي عدد فيه $|c| > 2$ ليس جزءًا من مجموعة ماندلبرو، ومع ذلك، فإذا مثلنا نقط مجموعة ماندلبرو في المستوى المركب، فسيظهر جسم رائع بشكل مذهش. في الشكل A.8، تمثل النقاط السوداء جزءًا من مجموعة ماندلبرو بينما تُرَمَز النقاط المتبقية بالألوان وفقًا لمدى سرعة تباعد z_n إلى ما لا نهاية.



الشكل A.8 مجموعة ماندلبرو في المستوى المركب.

الملحق B

خواص العناصر

Z العدد الذري (عدد البروتونات في النواة = عدد الإلكترونات)
 ρ كثافة الكتلة عند درجة حرارة 0°C ($= 273.15\text{ K}$) وضغط 1 غلاف جوي
 m الوزن الذري القياسي (متوسط كتلة الذرة، متوسط كتل النظائر المرجح حسب توافرها في الطبيعة)
 T الانصهار درجة حرارة الانصهار (نقطة التحول بين الحالة الصلبة والسائلة) عند ضغط 1 atm
 T الغليان درجة حرارة الغليان (نقطة التحول بين الحالة السائلة والغازية) عند ضغط 1 atm
 L_m حرارة الانصهار/الاندماج
 L_v حرارة التبخر
 E_1 طاقة التأين (الطاقة اللازمة لإزالة أقل الإلكترونات ارتباطاً بالذرة)

E_1 (eV)	L_v (kJ/mol)	L_m (kJ/mol)	T غليان (K)	T انصهار (K)	m (g/mol)	ρ (g/cm ³)	الترتيب الإلكتروني	الاسم	الرمز	Z
13.5984	0.904	0.117	20.28	14.01	1.00794	$8.988 \cdot 10^{-5}$	$1s^1$	الهيدروجين غاز	H	1
24.5874	0.0829	—	4.22	—	4.002602	$1.786 \cdot 10^{-4}$	$1s^2$	هيليوم غاز	He	2
5.3917	147.1	3.00	1615	453.69	6.941	0.534	[He] $2s^1$	الليثيوم	Li	3
9.3227	297	7.895	2742	1560	9.012182	1.85	[He] $2s^2$	البريليوم	Be	4
8.2980	480	50.2	4200	2349	10.811	2.34	[He] $2s^2 2p^1$	البورون	B	5
11.2603	710.9	117	4300	3800	12.0107	2.267	[He] $2s^2 2p^2$	الكربون جرافيت	C	6
14.5341	5.56	0.72	77.36	63.1526	14.0067	$1.251 \cdot 10^{-3}$	[He] $2s^2 2p^3$	النيتروجين غاز	N	7
13.6181	6.82	0.444	90.20	54.36	15.9994	$1.429 \cdot 10^{-3}$	[He] $2s^2 2p^4$	الأكسجين غاز	O	8
17.4228	6.62	0.510	85.03	53.53	18.998403	$1.7 \cdot 10^{-3}$	[He] $2s^2 2p^5$	الفلور غاز	F	9
21.5645	1.71	0.335	27.07	24.56	20.1797	$9.002 \cdot 10^{-4}$	[He] $2s^2 2p^6$	النيون غاز	Ne	10
5.1391	97.42	2.60	1156	370.87	22.989770	0.968	[Ne] $3s^1$	الصوديوم	Na	11
7.6462	128	8.48	1363	923	24.3050	1.738	[Ne] $3s^2$	المغنيسيوم	Mg	12
5.9858	294.0	10.71	2792	933.47	26.981538	2.70	[Ne] $3s^2 3p^1$	الألمنيوم	Al	13
8.1517	359	50.21	3538	1687	28.0855	2.3290	[Ne] $3s^2 3p^2$	السيليكون	Si	14
10.4867	12.4	0.66	550	317.3	30.973761	1.823	[Ne] $3s^2 3p^3$	الفوسفور أبيض	P	15
10.3600	45	1.727	717.8	388.36	32.065	1.92–2.07	[Ne] $3s^2 3p^4$	الكبريت	S	16
12.9676	20.41	6.406	239.11	171.6	35.453	$3.2 \cdot 10^{-3}$	[Ne] $3s^2 3p^5$	الكلور	Cl	17
15.7596	6.43	1.18	87.30	83.80	39.948	$1.784 \cdot 10^{-3}$	[Ne] $3s^2 3p^6$	الأرجون	Ar	18
4.3407	79.1	2.4	1032	336.53	39.0983	0.89	[Ar] $4s^1$	البوتاسيوم	K	19

E_1 (eV)	L_v (kJ/mol)	L_m (kJ/mol)	$T_{\text{غليان}}$ (K)	$T_{\text{انصهار}}$ (K)	m (g/mol)	ρ (g/cm ³)	الترتيب الإلكتروني	الاسم	الرمز	Z
6.1132	154.7	8.54	1757	1115	40.078	1.55	[Ar]4s ²	الكالسيوم	Ca	20
6.5615	332.7	14.1	3109	1814	44.955910	2.985	[Ar]3d ¹ 4s ²	السكانديوم	Sc	21
6.8281	425	14.15	3560	1941	47.867	4.506	[Ar]3d ² 4s ²	التيتانيوم	Ti	22
6.7462	459	21.5	3680	2183	50.9415	6.0	[Ar]3d ³ 4s ²	الفاناديوم	V	23
6.7665	339.5	21.0	2944	2180	51.9961	7.19	[Ar]3d ⁵ 4s ¹	الكروم	Cr	24
7.4340	221	12.91	2334	1519	54.938049	7.21	[Ar]3d ⁵ 4s ²	المنجنيز	Mn	25
7.9024	340	13.81	3134	1811	55.845	7.874	[Ar]3d ⁶ 4s ²	الحديد	Fe	26
7.8810	377	16.06	3200	1768	58.933200	8.90	[Ar]3d ⁷ 4s ²	الكوبالت	Co	27
7.6398	377.5	17.48	3186	1728	58.6934	8.908	[Ar]3d ⁸ 4s ²	النيكل	Ni	28
7.7264	300.4	13.26	2835	1357.77	63.546	8.94	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹	النحاس	Cu	29
9.3942	123.6	7.32	1180	692.68	65.409	7.14	[Ar]3d ¹⁰ 4s ²	الزنك	Zn	30
5.9993	254	5.59	2477	302.9146	69.723	5.91	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹	الجالسيوم	Ga	31
7.8994	334	36.94	3106	1211.40	72.64	5.323	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	الجرمانيوم	Ge	32
9.7886	34.76	24.44	887	1090	74.92160	5.727	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ³	الزرنيخ	As	33
9.7524	95.48	6.69	958	494	78.96	4.28–4.81	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴	السيلينيوم	Se	34
11.8138	29.96	10.571	332.0	265.8	79.904	3.1028	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	البروم	Br	35
13.9996	9.08	1.64	119.93	115.79	83.798	3.749·10 ⁻³	[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶	الكريبتون غاز	Kr	36
4.1771	75.77	2.19	961	312.46	85.4678	1.532	[Kr]5s ¹	الروبيديوم	Rb	37
5.6949	136.9	7.43	1655	1050	87.62	2.64	[Kr]5s ²	السترونشيوم	Sr	38
6.2173	365	11.42	3609	1799	88.90585	4.472	[Kr]4d ¹ 5s ²	اليتريوم	Y	39
6.6339	573	14	4682	2128	91.224	6.52	[Kr]4d ² 5s ²	الزركونيوم	Zr	40
6.7589	689.9	30	5017	2750	92.90638	8.57	[Kr]4d ⁴ 5s ¹	النيوبيوم	Nb	41
7.0924	617	37.48	4912	2896	95.94	10.28	[Kr]4d ⁵ 5s ¹	الموليبدينوم	Mo	42
7.28	585.2	33.29	4538	2430	(98)	11	[Kr]4d ⁵ 5s ²	تكنيشيوم	Tc	43
7.3605	591.6	38.59	4423	2607	101.07	12.45	[Kr]4d ⁷ 5s ¹	الروثينيوم	Ru	44
7.4589	494	26.59	3968	2237	102.90550	12.41	[Kr]4d ⁸ 5s ¹	الروديوم	Rh	45
8.3369	362	16.74	3236	1828.05	106.42	12.023	[Kr]4d ¹⁰	البالاديوم	Pd	46
7.5762	250.58	11.28	2435	1234.93	107.8682	10.49	[Kr]4d ¹⁰ 5s ¹	الفضة	Ag	47
8.9938	99.87	6.21	1040	594.22	112.411	8.65	[Kr]4d ¹⁰ 5s ²	الكاديوم	Cd	48
5.7864	231.8	3.281	2345	429.7485	114.818	7.31	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹	الإنديوم	In	49
7.3439	296.1	7.03	2875	505.08	118.710	7.365	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ²	القصدير الأبيض	Sn	50
8.6084	193.43	19.79	1860	903.78	121.760	6.697	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ³	الأنثيمون	Sb	51
9.0096	114.1	17.49	1261	722.66	127.60	6.24	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴	التيلوريوم	Te	52
10.4513	41.57	15.52	457.4	386.85	126.90447	4.933	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵	اليود	I	53
12.1298	12.64	2.27	165.03	161.4	131.293	5.894·10 ⁻³	[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶	الزينون غاز	Xe	54
3.8939	63.9	2.09	944	301.59	132.90545	1.93	[Xe]6s ¹	السيوم	Cs	55
5.2117	140.3	7.12	2170	1000	137.327	3.51	[Xe]6s ²	الباريوم	Ba	56
5.5769	402.1	6.20	3737	1193	138.9055	6.162	[Xe]5d ¹ 6s ²	اللانثانوم	La	57
5.5387	398	5.46	3716	1068	140.116	6.770	[Xe]4f ¹ 5d ¹ 6s ²	السيريم	Ce	58
5.473	331	6.89	3793	1208	140.90765	6.77	[Xe]4f ³ 6s ²	البراسيوديميوم	Pr	59
5.5250	289	7.14	3347	1297	144.24	7.01	[Xe]4f ⁴ 6s ²	النيوديميوم	Nd	60
5.582	289	7.13	3273	1315	(145)	7.26	[Xe]4f ⁵ 6s ²	البروميثيوم	Pm	61

E_1 (eV)	L_v (kJ/mol)	L_m (kJ/mol)	T غليان (K)	T انصهار (K)	m (g/mol)	ρ (g/cm ³)	الترتيب الإلكتروني	الاسم	الرمز	Z
5.6437	165	8.62	2067	1345	150.36	7.52	[Xe]4f ⁶ 6s ²	السماريوم	Sm	62
5.6704	176	9.21	1802	1099	151.964	5.264	[Xe]4f ⁷ 6s ²	اليوروبيوم	Eu	63
6.1498	301.3	10.05	3546	1585	157.25	7.90	[Xe]4f ⁷ 5d ¹ 6s ²	الجادولينيوم	Gd	64
5.8638	293	10.15	3503	1629	158.92534	8.23	[Xe]4f ⁹ 6s ²	التربيوم	Tb	65
5.9389	280	11.06	2840	1680	162.500	8.540	[Xe]4f ¹⁰ 6s ²	الدسبروزيوم	Dy	66
6.0215	265	17.0	2993	1734	164.93032	8.79	[Xe]4f ¹¹ 6s ²	الهولميوم	Ho	67
6.1077	280	19.90	3141	1802	167.259	9.066	[Xe]4f ¹² 6s ²	الإربيوم	Er	68
6.1843	247	16.84	2223	1818	168.93421	9.32	[Xe]4f ¹³ 6s ²	الثوليوم	Tm	69
6.2542	159	7.66	1469	1097	173.04	6.90	[Xe]4f ¹⁴ 6s ²	الإيتربيوم	Yb	70
5.4259	414	22	3675	1925	174.967	9.841	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ²	اللوتيشيوم	Lu	71
6.8251	571	27.2	4876	2506	178.49	13.31	[Xe]4f ¹⁴ 5d ² 6s ²	الهافنيوم	Hf	72
7.5496	732.8	36.57	5731	3290	180.9479	16.69	[Xe]4f ¹⁴ 5d ³ 6s ²	التنتالوم	Ta	73
7.8640	806.7	52.31	5828	3695	183.84	19.25	[Xe]4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ²	التنغستين	W	74
7.8335	704	60.3	5869	3459	186.207	21.02	[Xe]4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s ²	الرينيوم	Re	75
8.4382	738	57.85	5285	3306	190.23	22.61	[Xe]4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ²	الأوزميوم	Os	76
8.9670	563	41.12	4701	2739	192.217	22.56	[Xe]4f ¹⁴ 5d ⁷ 6s ²	الإيريديوم	Ir	77
8.9588	469	22.17	4098	2041.4	195.078	21.45	[Xe]4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s ¹	البلاتين	Pt	78
9.2255	324	12.55	3129	1337.33	196.96655	19.3	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹	الذهب	Au	79
10.4375	59.11	2.29	629.88	234.32	200.59	13.534	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ²	الزئبق سائل	Hg	80
6.1082	165	4.14	1746	577	204.3833	11.85	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹	الثاليوم	Tl	81
7.4167	179.5	4.77	2022	600.61	207.2	11.34	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²	الرصاص	Pb	82
7.2855	151	11.30	1837	544.7	208.98038	9.78	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³	البيزموث	Bi	83
8.414	102.91	13	1235	527	(209)	9.320	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴	البولونيوم	Po	84
?	?	?	?	?	(210)	?	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵	الأستاتين	At	85
10.7485	18.10	3.247	211.3	202	(222)	9.73 · 10 ⁻³	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶	الرادون	Rn	86
4.0727	~65	~2	~950	~300	(223)	1.87	[Rn]7s ¹	الفرانسيوم	Fr	87
5.2784	113	8.5	2010	973	(226)	5.5	[Rn]7s ²	الراديوم	Ra	88
5.17	400	14	3471	1323	(227)	10	[Rn]6d ¹ 7s ²	الأكتينيوم	Ac	89
6.3067	514	13.81	5061	2115	232.0381	11.7	[Rn]6d ² 7s ²	الثوريوم	Th	90
5.89	481	12.34	~4300	1841	231.03588	15.37	[Rn]5f ² 6d ¹ 7s ²	البروتكتينيوم	Pa	91
6.1941	417.1	9.14	4404	1405.3	238.02891	19.1	[Rn]5f ³ 6d ¹ 7s ²	اليورانيوم	U	92
6.2657	336	3.20	4273	910	(237)	20.45	[Rn]5f ⁴ 6d ¹ 7s ²	النيبتونيوم	Np	93
6.0260	333.5	2.82	3505	912.5	(244)	19.816	[Rn]5f ⁶ 7s ²	البوتونيوم	Pu	94
5.9738	238.5	14.39	2880	1449	(243)	12	[Rn]5f ⁷ 7s ²	الأمريسيوم	Am	95
5.9914	?	~15	3383	1613	(247)	13.51	[Rn]5f ⁷ 6d ¹ 7s ²	الكوريوم	Cm	96
6.1979	?	?	?	1259	(247)	~14	[Rn]5f ⁹ 7s ²	البركليوم	Bk	97
6.2817	?	?	1743	1173	(251)	15.1	[Rn]5f ¹⁰ 7s ²	الكاليفورنيوم	Cf	98
6.42	?	?	?	1133	(252)	8.84	[Rn]5f ¹¹ 7s ²	الآينشتاينيوم	Es	99
6.50	?	?	?	1800	(257)	?	[Rn]5f ¹² 7s ²	الفيرميوم	Fm	100
6.58	?	?	?	1100	(258)	?	[Rn]5f ¹³ 7s ²	المنديليفيوم	Md	101
6.65	?	?	?	?	(259)	?	[Rn]5f ¹⁴ 7s ²	النوبليوم	No	102

E_1 (eV)	L_v (kJ/mol)	L_m (kJ/mol)	T غليان (K)	T انصهار (K)	m (g/mol)	ρ (g/cm ³)	الترتيب الإلكتروني	الاسم	الرمز	Z
4.9	?	?	?	?	(262)	?	[Rn]5f ¹⁴ 7s ² 7p ¹	اللورانسيم	Lr	103
6	?	?	?	?	(263)	?	[Rn]5f ¹⁴ 6d ² 7s ²	الردفورديوم	Rf	104
?	?	?	?	?	(268)	?	[Rn]5f ¹⁴ 6d ³ 7s ²	الدوبنيوم	Db	105
?	?	?	?	?	(271)	?	[Rn]5f ¹⁴ 6d ⁴ 7s ²	السيبورجيوم	Sg	106
?	?	?	?	?	(270)	?	[Rn]5f ¹⁴ 6d ⁵ 7s ²	البوريوم	Bh	107
?	?	?	?	?	(270)	?	[Rn]5f ¹⁴ 6d ⁶ 7s ²	الهاسيوم	Hs	108
?	?	?	?	?	(278)	?	[Rn]5f ¹⁴ 6d ⁷ 7s ²	المانتيوم	Mt	109
?	?	?	?	?	(281)	?	*[Rn]5f ¹⁴ 6d ⁹ 7s ¹	الدارمشتاتيوم	Ds	110
?	?	?	?	?	(281)	?	*[Rn]5f ¹⁴ 6d ⁹ 7s ²	الروتجينيوم	Rg	111
?	?	?	?	?	(285)	?	*[Rn]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ²	الكوبرنيسيوم	Cn	112
?	?	?	?	?	(286)	?	*[Rn]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ¹			113
?	?	?	?	?	(289)	?	*[Rn]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ²	الفليروفيوم	Fl	114
?	?	?	?	?	(289)	?	*[Rn]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ³			115
?	?	?	?	?	(293)	?	*[Rn]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁴	الليفرموريوم	Lv	116
?	?	?	?	?	(294)	?	*[Rn]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁵			117
?	?	?	?	?	(294)	?	*[Rn]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁶			118

(أطول النظائر
عمراً)

*متوقع

إجابات أسئلة ومسابائل مختارة

- $1.01 \times 10^3 \text{ m}^3$ 9.55
 $6.37 \times 10^{26} \text{ J/m}^3$ (a) 9.57
 $7.07 \times 10^9 \text{ kg/m}^3$ (b)
 $4.17 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$ 9.59
 1.1 9.61
 $7.54 \times 10^{-3} \text{ V}$ 9.63
 لا تتغير. 9.65
 0.0866 H 9.67
 10.0 V يكون التيار المستحث في عكس اتجاه عقارب الساعة. 9.69
 1.96 m^2 9.71
 0.275 H 9.73
 $i_2 = 2.00 \text{ mA}$, $i_1 = 4.00 \text{ mA}$ (a) 9.75
 2.40 mW (b)
 0.300 mN (c)
 $3.51 \text{ } \mu\text{V}$ 9.77
 0.257 mN (a) 9.79
 $25.8 \text{ } \mu\text{W}$ (b)
 $25.7 \text{ } \mu\text{W}$ (c)

تمارين بمعطيات متعددة

- $17.3 \text{ } \Omega$ 9.80
 $V_{\text{ind,max}} = 1.21 \times 10^{-7} \text{ V}$ 9.83

الوحدة 10: دوائر التيار المتردد

الاختيار من متعدد

- d 10.1
 b 10.3
 d 10.5
 d 10.7
 a 10.9

التمارين

- $9.42 \times 10^{-4} \text{ s}$ 10.27
 7.15 mF 10.29
 5.63 ms , 3.25 ms , 1.19 ms 10.31
 ينخفض بمقدار 15.2% 10.33
 251 Hz 10.35
 $500. \text{ rad/s}$ 10.37
 2240 rad/s (a) 10.39
 0.400 A (b)
 $117 \text{ } \Omega$, 0.549 rad 10.41
 537 V 10.43

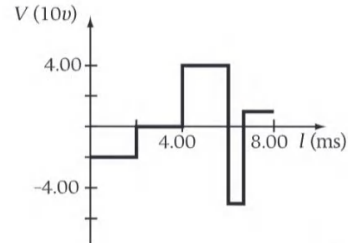
الوحدة 9: الحث الكهرومغناطيسي

الاختيار من متعدد

- d 9.1
 a 9.3
 a 9.5
 d 9.7
 a 9.9
 c 9.11
 e 9.13

التمارين

- $1.89 \times 10^{-5} \text{ V}$ 9.9
 0 9.31
 $i = -\frac{\mu_0 \pi a^2 V_0 \omega}{2bR_1 R_2} \cos \omega t$, $\Delta V_{\text{ind}} = -\frac{\mu_0 \pi a^2 V_0 \omega}{2bR_1} \cos \omega t$ 9.33
 7.07 mA (a) 9.35
 (b) في اتجاه عقارب الساعة.
 0.558 V 9.37
 $v_{\text{term}} = \frac{mgR}{w^2 B^2}$ 9.39
 $6.24 \times 10^{-7} \text{ V}$ 9.41
 17.5 Hz 9.43
 0.370 A (a) 9.45
 0.262 A , 103 W (b) 9.47



- $1.00 \text{ } \mu\text{s}$ (a) 9.49
 $10.0 \text{ } \mu\text{A}$, $8.65 \text{ } \mu\text{A}$: 0 (b)
 11.3 V 9.51
 6.00 A (a) 9.53
 3.00 A (b)
 3.00 A (c)
 -18.0 V (d)
 -18.0 V (e)
 0 (f)
 0 (g)

- 1.3 W/m² (a) 11.37
 1.2 W/m² (b)
 0.12 W/m² (c)
 1.70 × 10⁶ V/m 11.39
 $S_{\text{ave}} = 13.3 \text{ W/m}^2$ 11.41
 $U = 4.43 \times 10^{-8} \text{ J/m}^3$ (a)
 $B = 3.33 \times 10^{-7} \text{ T}$ (b)
 $I = 1.27 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ (a) 11.43
 الشمس.
 $E_{\text{rms}} = 6.93 \times 10^4 \text{ V/m}$ (b)
 $S_{\text{ave}} = 1.27 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ (c)
 $S(x, t) = 2.55 \times 10^7 \text{ W/m}^2 \sin^2(1.22 \times 10^7 x - 3.66 \times 10^{15} t)$ (d)
 $B_{\text{rms}} = 2.31 \times 10^{-4} \text{ T}$ (e)
 $B = 3.42 \mu\text{T}$, $E = 1.03 \text{ kV/m}$ (a) 11.45
 $F = 2.50 \mu\text{N}$, $P_r = 3.33 \mu\text{Pa}$ (b)
 $3.27 \times 10^{-6} \text{ N}$ 11.47
 15.1 mW 11.49
 $w = 3.08 \times 10^{-9} \text{ N} = 3.08 \text{ nN}$ (a) 11.51
 $P_r = 5.31 \mu\text{N/m}^2$, $I = 1.59 \text{ kW/m}^2$ (b)
 $N = 185$ ليتر (c)
 2.50 mW 11.53
 $E = 2.92 \times 10^3 \text{ V/m}$, $I_2 = 1.13 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 11.55
 $B = 9.74 \times 10^{-6} \text{ T}$
 $E_{\text{total}} = 518 \text{ kWh}$ 11.57
 $3.88 \times 10^5 \text{ V/m}$ 11.59
 136 W 11.61
 100 V/m 11.63
 6.3 cm 11.65
 $7.07 \times 10^{-8} \text{ T}$ (a) 11.67
 37.9 W (b)
 $E_{\text{rms}} = 775 \text{ V/m}$ (a) 11.69
 $E_{\text{tot}} = 1.67 \times 10^{-11} \text{ J}$ (b)
 $2.07 \times 10^7 \text{ m/s}^2$ 11.71
 $S = 3.32 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (a) 11.73
 $F_{\text{rms}} = 1.27 \times 10^{-20} \text{ N}$ (b)
 $N = 4.00 \times 10^{23}$ (أو 8 ساعات و 57 دقيقة)؛ $t = 8.95 \text{ h}$ 11.75

تمارين معطيات متعددة

- 262.5 V/m 11.77
 87.9% 11.81

- $I_{\text{max}} = 34.3 \text{ A}$ (a) 10.45
 $\theta = 0.816 \text{ rad}$ (b)
 $\phi' = 0 \text{ rad}$, $I_m = 50.0 \text{ A}$, $C = 757 \mu\text{F}$ (c)
 $C = 1.33 \text{ nF}$ (a) 10.47
 مكثف سعته 1.00 nF
 124 kHz (b)
 $Q = (1/R)\sqrt{L/C}$ 10.49
 18.4 kHz (a) 10.51
 2.25 W (b)
 0.392 pF (a) 10.53
 11.9 Ω (b)
 1.1 V (a) 10.55
 0 V (b)
 2.03 W 10.57
 14 V (a) 10.59
 9.0 V (b)
 2.53 pF 10.61
 0.77 A (a) 10.63
 160 V (b)
 1.45 Ω 10.65
 0.101 A (a) 10.67
 $7.02 \times 10^{-4} \text{ s}$ (b)
 10.0Ω (a) 10.69
 7.50Ω (b)
 $5.97 \times 10^{-5} \text{ H}$ (c)
 26.7 kHz (d)
 $1.01 \times 10^{-3} \text{ J/m}^3$ (a) 10.71
 10.1 A (b)
 $P = \frac{1}{2} I_R^2 R (1 - \cos(2\omega t))$ 10.73
 377 Hz 10.75
 1990 Hz 10.77

تمارين معطيات متعددة

160. Ω 10.78

الوحدة 11: الموجات الكهرومغناطيسية

الاختيار من متعدد

- c 11.1
 b 11.3
 a 11.5
 c 11.7
 c 11.9

تمارين

- $2.50 \times 10^{-5} \text{ T}$ 11.23
 $10.0 \mu\text{A}$ 11.25
 $i_d = \epsilon_0 R \left(\frac{A}{L} \right) \frac{di}{dt} = \epsilon_0 \rho \frac{di}{dt}$ 11.27
 0.984 ft 11.29
 0.03 s (a) 11.31
 0.24 s (b)
 الصناعي، سيتلقى عمر الرد من شقيقه بعد 0.5 s. وهو ما يمكن ملاحظته بسهولة.
 $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ to $8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 11.33
 3.2 mH 11.35

credits 1

شكر و تقدير

Photo: ix (tl)W. Bauer and G. D. Westfall, (tr)W. Bauer and G. D. Westfall, (tr)W. Bauer and G. D. Westfall, (cl)Image Source/Superstock, (cr)Tomas Kotouc/Shutterstock.com, (bl)Raimundas/Shutterstock.com; vi Photo Courtesy of Okemos Studio of Photography; x (tl)W. Bauer and G. D. Westfall, (tr)W. Bauer and G. D. Westfall, (br)Sky Light Pictures/Shutterstock.com; xiv (bl)W. Bauer and G. D. Westfall, (bc)W. Bauer and G. D. Westfall, (br)W. Bauer and G. D. Westfall, (br)W. Bauer and G. D. Westfall; **225** Sky Light Pictures/Shutterstock.com; **234** W. Bauer and G. D. Westfall; **236** Martin Marietta Corporation/Science Source; **239** W. Bauer and G. D. Westfall; **240** NosorogUA/Shutterstock; **248** Daisuke Morita/Getty Images; **254** ©UpperCut Images/SuperStock; **257** W. Bauer and G. D. Westfall; **269** W. Bauer and G. D. Westfall; **271** Mark Dierker/McGraw-Hill Education; **279** (t)Malcolm Fife/age fotostock, (b)W. Bauer and G. D. Westfall; **280** W. Bauer and G. D. Westfall; **289** Kevin Foy/Alamy; **297** (l)Kim Steele/Getty Images, (c)JPL/NASA/USGS, (r)W. Bauer and G. D. Westfall; **298** (l-r, t-b)Zoonar GmbH/Alamy, (2)W. Bauer and G. D. Westfall, (3)Don Tremain/Getty Images, (4)CNRI/Science Source, (5)GeoStock/Getty Images, (6)Russell Illig/Getty Images, (7)Russell Illig/Getty Images, (8)Masterchief_Productions/Shutterstock.com, (9)David R. Frazier Photolibrary/Alamy Images, (10)PhotoDisc/Getty Images, (11)W. Bauer and G. D. Westfall, (12)ImageState/Alamy Stock Photo; **302** (t)John Keating/Science Source, (b)6th Gear Advertising/Shutterstock.com; **313** W. Bauer and G. D. Westfall; **EM** Compliments of the United Arab Emirates Ministry of Education.

مركز اتصال وزارة التربية والتعليم
اقتراح - استفسار - شكوى



80051115



04-2176855

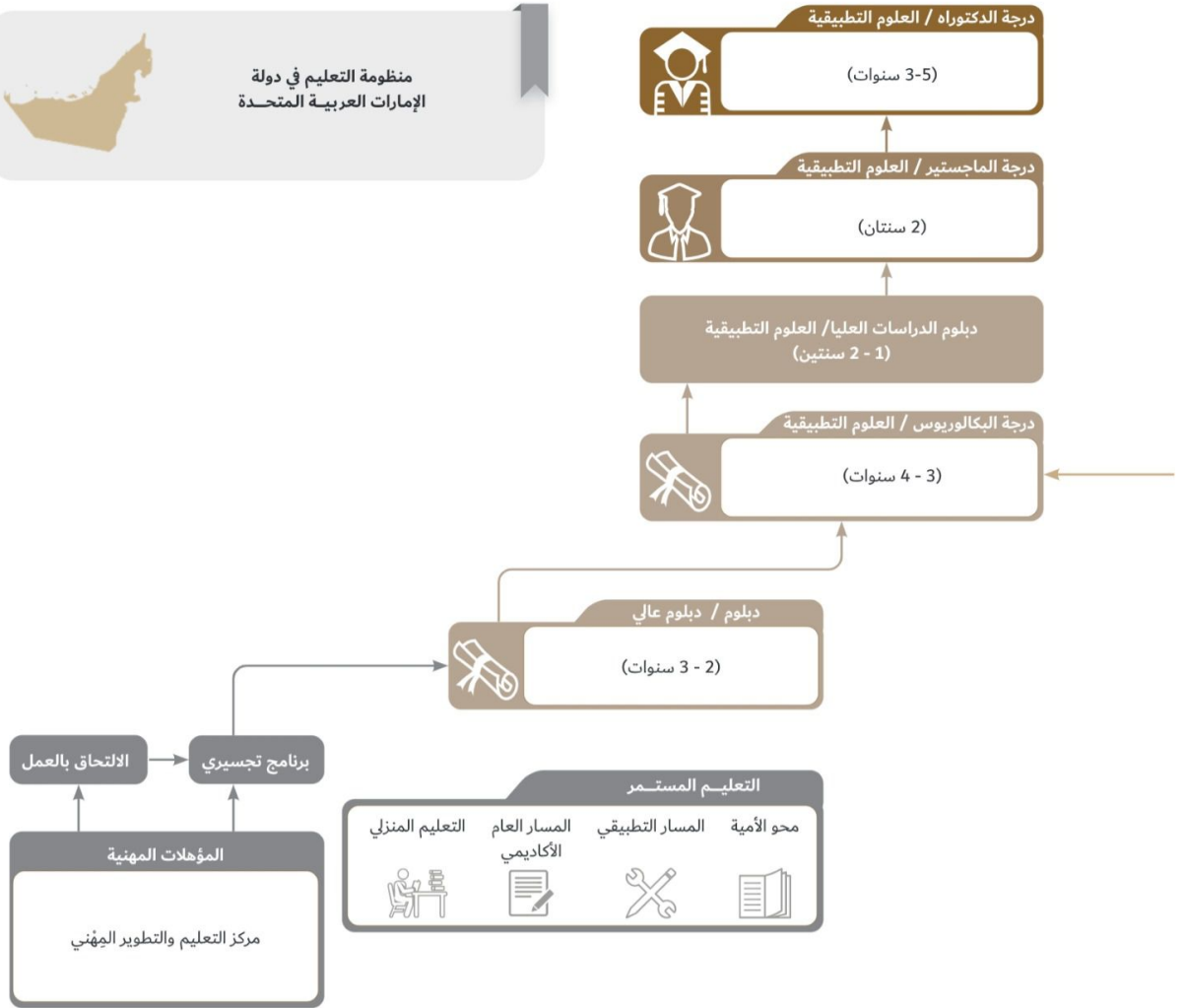


www.moe.gov.ae



ccc.moe@moe.gov.ae





الدليل الإرشادي



هذا الملف مقدم بواسطة



مكتبة الفكر



مكتبة شاملة لكل ما يحتاجه
الطالب من ملفات وكتب في
دراسته ومطالعه.

متابعة