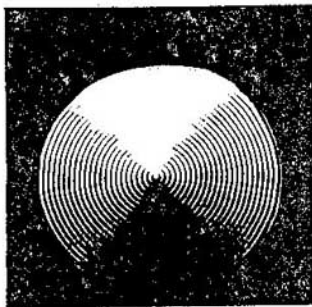


G. YA. MIAKISHEV



FISICA

4



Г.Я. Мякушев
Б.Б. Буховцев
“Физика”
Учебник для
10 класса
Москва
“Просвещение”

G.Ya.Miákishev B.B.Bújovtsev

FISICA 4

Traducido del ruso por el ingeniero
Antonio Molina García

Editorial Mir Moscú



A nuestros lectores:

Mir edita libros soviéticos traducidos al español, inglés, francés, árabe y otros idiomas extranjeros. Entre ellos figuran las mejores obras de las distintas ramas de la ciencia y la técnica: manuales para los centros de enseñanza superior y escuelas tecnológicas; literatura sobre ciencias naturales y médicas. También se incluyen monografías, libros de divulgación científica y ciencia-ficción.

Dirijan sus opiniones a Editorial Mir, 1 Rizhski per., 2, 129820, Moscú, GSP, 1-110, URSS.

На испанском языке

© издательство «Просвещение». 1983

© traducción al español, editorial Mir, 1986

Índice

Oscilaciones y ondas

Introducción	11
1. Oscilaciones mecánicas	12
1.1. Oscilaciones libres y forzadas	12
1.2. Condiciones necesarias para que se produzcan oscilaciones libres	14
1.3. Péndulo simple	16
1.4. Dinámica del movimiento oscilatorio	18
1.5. Oscilaciones armónicas	20
1.6. Fase de las oscilaciones	25
1.7. Velocidad y aceleración en las oscilaciones armónicas	28
1.8. Transformaciones de la energía en el caso de las oscilaciones armónicas	29
1.9. Oscilaciones forzadas. Resonancia	31
1.10. Aplicaciones de la resonancia y lucha contra ella	35
1.11. Autooscilaciones	37
Ejemplos de resolución de problemas	39
Ejercicio 1	41
Breve resumen del capítulo 1	43
2. Oscilaciones eléctricas	45
2.1. Oscilaciones eléctricas libres y forzadas	45
2.2. Circuito oscilante	47
2.3. Analogía entre las oscilaciones mecánicas y eléctricas	48
2.4. Período de las oscilaciones eléctricas libres. Ecuación de definición de los procesos en el circuito oscilante	50
2.5. Corriente eléctrica alterna	53
2.6. Resistencia óhmica en un circuito de corriente alterna. Valor eficaz de la intensidad de la corriente y de la tensión	56

2.7. Capacidad en un circuito de corriente alterna	59
2.8. Inductancia en un circuito de corriente alterna	61
2.9. Resonancia en un circuito eléctrico	64
2.10. Lámpara electrónica de tres electrodos	68
2.11. Oscilador de lámpara	70
Ejemplos de resolución de problemas	73
Ejercicio 2	75
Breve resumen del capítulo 2	76
3. Producción, transmisión y utilización de la energía eléctrica	78
3.1. Generación de energía eléctrica	78
3.2. Transformador	81
3.3. Producción y utilización de la energía eléctrica	83
3.4. Transmisión de la energía eléctrica	87
3.5. Logros y perspectivas de la electrificación de la URSS	89
Ejercicio 3	90
Breve resumen del capítulo 3	91
4. Ondas mecánicas. Sonido	92
4.1. Fenómenos ondulatorios	92
4.2. Propagación de las ondas mecánicas	95
4.3. Longitud de onda. Velocidad de onda	97
4.4. Ondas en un medio	99
4.5. Ondas sonoras	101
4.6. Sonidos musicales y ruidos. Intensidad y altura de un sonido	105
4.7. Resonancia acústica	107
4.8. Ultrasonido	107
4.9. Interferencia de ondas	109
4.10. Principio de Huygens. Ley de reflexión de las ondas	113
4.11. Difracción de las ondas	115
Ejercicio 4	117
Breve resumen del capítulo 4	117
5. Ondas electromagnéticas	119
5.1. Relación entre el campo eléctrico alterno y el campo magnético alterno	119
5.2. Campo electromagnético	120
5.3. Cómo se transmiten las interacciones electromagnéticas	122
5.4. Onda electromagnética	123
5.5. Emisión de las ondas electromagnéticas	125
5.6. A.S. Popov inventor de la radio	129
5.7. Principios básicos de la radiocomunicación	131
5.8. Cómo se efectúa la modulación y la detección	133

5.9. Propiedades de las ondas electromagnéticas	136
5.10. Propagación de las ondas hertzianas	138
5.11. Radiolocalización	139
5.12. Idea de la televisión	141
5.13. Desarrollo de los medios de comunicación en la URSS	143
Ejercicio 5	144
Breve resumen del capítulo 5	145

Óptica

Introducción	146
--------------	-----

6. Óptica geométrica	149
-----------------------------	------------

6.1. Propagación rectilínea de la luz	149
6.2. Fotometría. Flujo luminoso. Intensidad de la luz	151
6.3. Iluminación	153
Ejemplos de resolución de problemas	156
Ejercicio 6	157
6.4. Ley de la reflexión de la luz. Construcción de la imagen en un espejo plano	158
Ejemplos de resolución de problemas	160
Ejercicio 7	161
6.5. Ley de la refracción de la luz	162
6.6. Reflexión total	166
Ejemplos de resolución de problemas	169
Ejercicio 8	171
6.7. Lente	171
6.8. Construcción de la imagen producida por una lente	176
6.9. Fórmula de la lente delgada. Aumento de la lente	178
6.10. Cámara fotográfica. Aparato de proyección	180
6.11. Ojo. Lentes	182
6.12. Lupa. Microscopio	185
Ejemplos de resolución de problemas	187
Ejercicio 9	188
Breve resumen del capítulo 6	189

7. Ondas luminosas	191
---------------------------	------------

7.1. Velocidad de la luz	191
7.2. Deducción de la ley de la refracción de la luz	193
7.3. Dispersión de la luz	195
7.4. Interferencia de la luz	197
7.5. Algunas aplicaciones de la interferencia	200
7.6. Difracción de la luz	207
7.7. Red de difracción	211

7.8. Carácter transversal de las ondas luminosas. Polarización de la luz	212
7.9. El carácter transversal de las ondas luminosas y la teoría electromagnética de la luz	216
Ejemplos de resolución de problemas	217
Ejercicio 10	218
Breve resumen del capítulo 7	219
8. Elementos de teoría de la relatividad	221
8.1. Leyes de la electrodinámica y principio de la relatividad	221
8.2. Postulados de la teoría de la relatividad	223
8.3. Relatividad de la simultaneidad	225
8.4. Consecuencias fundamentales que se deducen de los postulados de la teoría de la relatividad	227
8.5. Dependencia de la masa respecto de la velocidad. Dinámica relativista	229
8.6. Sincrofasotrón	231
8.7. Relación entre la masa y la energía	233
Ejercicio 11	235
Breve resumen del capítulo 8	235
9. Radiación y espectros	237
9.1. Tipos de radiación. Fuentes de luz	237
9.2. Espectros y aparatos espectrales	239
9.3. Tipos de espectros	241
9.4. Análisis espectral	243
9.5. Radiación infrarroja y ultravioleta	245
9.6. Rayos X	246
9.7. Escala de las radiaciones electromagnéticas	249
Breve resumen del capítulo 9	250
Física cuántica	
Introducción	252
10. Cuantos de luz. Acción de la luz	254
10.1. Efecto fotoeléctrico	254
10.2. Teoría del efecto fotoeléctrico	256
10.3. Fotones	258
10.4. Aplicaciones del efecto fotoeléctrico	259
10.5. Presión de la luz	261
10.6. Acción química de la luz. Fotografía	263
Ejercicio 12	265
Breve resumen del capítulo 10	265

11. Física atómica	267
11.1. Estructura del átomo. Experimentos de Rutherford	267
11.2. Postulados de Bohr	271
11.3. Modelo del átomo de hidrógeno según Bohr	273
11.4. Demostración experimental de la existencia de los estados estacionarios	276
11.5. Dificultades de la teoría de Bohr	278
11.6. Láseres	279
Ejercicio 13	282
Breve resumen del capítulo 11	283
12. Física del núcleo atómico	285
12.1. Núcleo atómico y partículas elementales	285
12.2. Métodos de observación y registro de las partículas elementales	285
12.3. Descubrimiento de la radioactividad	289
12.4. Rayos alfa, beta y gamma	291
12.5. Transiciones radiactivas	294
12.6. Ley de la desintegración radiactiva. Periodo de semidesintegración	296
12.7. Isótopos	298
12.8. Descubrimiento del neutrón	300
12.9. Estructura del núcleo atómico. Fuerzas nucleares.	302
12.10. Energía de enlace de los núcleos atómicos	304
12.11. Reacciones nucleares	306
12.12. Fisión de los núcleos de uranio	308
12.13. Reacciones nucleares en cadena	310
12.14. Reactor nuclear	312
12.15. Reacciones termonucleares	315
12.16. Utilización de la energía nuclear	317
12.17. Obtención de isótopos radiactivos y sus aplicaciones	319
12.18. Acción biológica de las radiaciones radiactivas	322
Ejercicio 14	323
Breve resumen del capítulo 12	324
13. Partículas elementales	326
13.1. ¿Qué es una partícula elemental?	326
13.2. Descubrimiento del positrón. Antipartículas	328
13.3. Desintegración del neutrón. Descubrimiento del neutrino	330
13.4. ¿Cuántas partículas elementales existen?	332
Breve resumen del capítulo 13	335

Importancia de la física para explicar el mundo y el desarrollo de las fuerzas productivas de la sociedad

14.1. Interpretación física del mundo como un todo único	337
14.2. La física y la revolución científico-técnica	340
Trabajos de laboratorio	343
Respuestas a los ejercicios	348
Índice alfabético de nombres y materias	350

Oscilaciones y ondas

Introducción

Hasta ahora, al estudiar la física, hemos seguido determinado orden. En "Física 2" (Editorial MIR) se examinó el MOVIMIENTO MECÁNICO: la variación de las posiciones de los cuerpos (o de sus partes) entre sí en el espacio con el correr del tiempo. En "Física 3", al explicar la termodinámica y la física molecular, se dieron a conocer los procesos térmicos. La segunda mitad del curso de física mencionado se consagró a los FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS. Pero el estudio de la electrodinámica no fue culminado. Aún quedan por conocer procesos tan importantes como la corriente alterna, las ondas radioeléctricas (ondas electromagnéticas) y otros. No obstante, si se hojean las primeras páginas del libro que proponemos, puede verse que el curso de "Física 4" empieza otra vez por la mecánica, es decir, considerando las OSCILACIONES MECÁNICAS. Sólo después de esto se prosigue el estudio, no culminado en "Física 3", de la electrodinámica. La razón de esto reside en lo siguiente.

En "Física 2", además de dar a conocer las leyes generales de la mecánica, se dedicó mucho tiempo al estudio de diversos tipos particulares de movimiento mecánico, tales como el movimiento uniformemente acelerado y el movimiento circular. Pero nada se dijo de tipos tan importantes de movimiento mecánico como las OSCILACIONES y las ONDAS. Claro está que nadie se olvidó de ellas. Existen razones de peso para que las oscilaciones y las ondas de distinta naturaleza física (mecánicas y electromagnéticas) se estudien juntas.

Puede pensarse, ¿qué habrá común entre las oscilaciones de un péndulo ordinario y la descarga de un condensador a través de una bobina de inductancia? Y, sin embargo, sí lo hay. Pronto se verá que tanto las oscilaciones mecánicas como las electromagnéticas se subordinan a leyes cuantitativas totalmente iguales. Esto se pone de manifiesto si nos interesamos no por lo QUÉ oscila (un peso sujeto a un muelle o una corriente eléctrica en un circuito), sino por CÓMO se realizan las oscilaciones. También están sometidos a las mismas leyes los procesos ondulatorios de distinta naturaleza.

En la física moderna se destaca una parte especial, la FÍSICA DE LAS OSCILACIONES O VIBRACIONES. En ella se consideran desde un mismo punto de vista las oscilaciones de distinta naturaleza. La física de las oscilaciones tiene gran importancia práctica. Se ocupa de investigar las vibraciones de las máquinas y mecanismos; sus deducciones sirven de base a la electrotecnia de las corrientes alternas y a la radiotecnia.

1.1. Oscilaciones libres y forzadas

Los movimientos oscilatorios, o simplemente oscilaciones, están muy extendidos en la naturaleza. Hacer que un objeto oscile es muy fácil.

Suspendamos un muelle de un soporte y sujetemos al extremo inferior del primero una bolita metálica. El muelle se alargará y la fuerza de elasticidad \vec{F}_0 equilibrará la fuerza de la gravedad \vec{G} que actúa sobre la bolita (fig. 1, a). Si ahora la bolita se saca de su posición de equilibrio, tirando ligeramente de ella hacia abajo, y se suelta, empieza a realizar un movimiento muy interesante, de abajo arriba, de arriba abajo y así sucesivamente (fig. 1, b). Este tipo de movimiento, en el cual un cuerpo se desplaza sucesivamente ora en un sentido ora en otro, se llama *oscilación*. Con el tiempo las oscilaciones se debilitan poco a poco (se amortiguan) y por fin la bolita se para.

Aún más sencillo es hacer que la bolita oscile si se suspende de un hilo. En la posición de equilibrio el hilo estará vertical y la fuerza de la gravedad \vec{G} que actúa sobre la bolita será equilibrada por la fuerza de elasticidad \vec{F}_0 del hilo (fig. 2, a). Si la bolita se desvía hacia un lado y se suelta, empieza a balancearse de derecha a izquierda y de izquierda a derecha (fig. 2, b), hasta que las oscilaciones se amortigüen. Una bolita suspendida de un hilo es un *péndulo simple*¹⁾. En general suele llamarse *péndulo* un cuerpo suspendido por un hilo o sujeto a un eje, que puede oscilar bajo la acción de la fuerza de la gravedad. El eje no debe pasar por el centro de gravedad del cuerpo. Puede darse el nombre de péndulo a una regla colgada de un clavo, a una lámpara colgante, a la cruz de una balanza de brazos iguales, etc.

¿Cuál es el rasgo más característico del movimiento oscilatorio? El que más salta a la vista es que durante las oscilaciones el movimiento del cuerpo SE REPITE o casi se repite. Así, el péndulo, después de realizar una oscilación, es decir, de recorrer el camino desde la posición extrema izquierda hasta la extrema derecha y viceversa, vuelve a efectuar este mismo movimiento. Si un movimiento se repite exactamente se dice que es *periódico*.

Las oscilaciones son movimientos que exacta o aproximadamente se repiten al cabo de intervalos de tiempo determinados.

Se repiten los movimientos de los émbolos del motor de un automóvil, los

¹⁾ Debe tenerse en cuenta que la bolita suspendida por el hilo sólo será un péndulo si sobre ella actúa la fuerza de la gravedad. El globo terráqueo que crea esta fuerza forma parte del sistema oscilante que, para abreviar, llamamos simplemente péndulo.

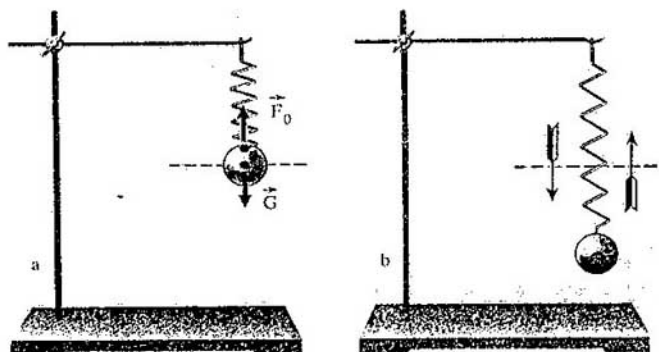


Fig. 1

de un flotador sobre las olas, los de las ramas de un árbol movidas por el viento, los de nuestro corazón. Todos estos movimientos son ejemplos de distintas oscilaciones.

OSCILACIONES LIBRES. El grupo de cuerpos, cuyo movimiento analizamos, se llama en mecánica *sistema de cuerpos* o simplemente *sistema*. Las fuerzas que actúan entre los cuerpos de un sistema se denominan *internas*. El nombre de *fuerzas exteriores* se da a las que actúan sobre los cuerpos del sistema por parte de cuerpos que no pertenecen a éste.

La forma más simple de oscilaciones es la que se produce en un sistema bajo la acción de las fuerzas internas, una vez que el sistema ha sido sacado de su posición de equilibrio. Estas oscilaciones se llaman *libres*. Las oscilaciones de

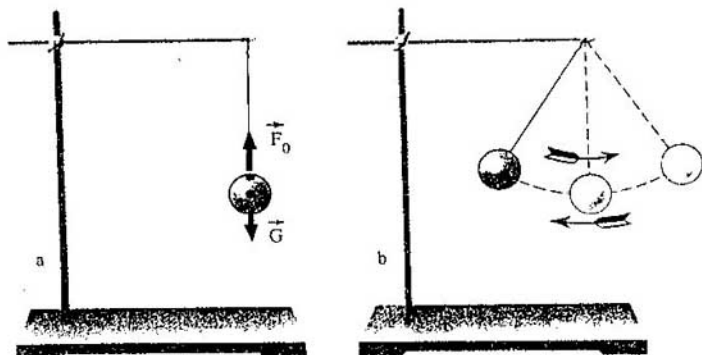


Fig. 2

un cuerpo sujeto a un muelle o de un cuerpo suspendido por un hilo son ejemplos de oscilaciones libres. Una vez que estos sistemas se sacan de sus posiciones de equilibrio, se crean unas condiciones en las cuales los cuerpos oscilan sin que sobre ellos actúen fuerzas exteriores variables periódicamente.

OSCILACIONES FORZADAS. Si con la mano empezamos a mover un libro empujándole hacia adelante y hacia atrás por una mesa, él realizará oscilaciones, pero éstas no serán libres. Las oscilaciones del libro en este caso se deberán a la acción de la fuerza, de módulo y sentido variables, que desarrollamos con la mano.

Las oscilaciones que realizan los cuerpos por la acción de fuerzas exteriores variables periódicamente se denominan *forzadas*.

Son oscilaciones forzadas, en particular, las de los émbolos en los cilindros de los motores de combustión interna, las de la aguja de una máquina de coser, etc.

1.2. Condiciones necesarias para que se produzcan oscilaciones libres

Veamos qué propiedades debe tener un sistema para que puedan producirse en él oscilaciones libres. Lo más conveniente es considerar las oscilaciones de una bolita a lo largo de una línea horizontal bajo la acción de la fuerza de elasticidad de un muelle (fig. 3)¹⁾.

Si la bolita se desplaza de su posición de equilibrio (fig. 3, a) hacia la derecha, la longitud del muelle aumenta en x_m (fig. 3, b) y sobre la bolita empieza a actuar la fuerza de elasticidad debida al muelle. Esta fuerza, según la ley de Hooke, es proporcional a la deformación del muelle y está dirigida hacia la izquierda. Bajo la acción de la fuerza de elasticidad, la bolita comienza a moverse aceleradamente hacia la izquierda y su velocidad aumenta. La fuerza de elasticidad irá disminuyendo, ya que la deformación del muelle va siendo menor. En el instante en que la bolita llega a la posición de equilibrio, la fuerza de la elasticidad del muelle se anula. Por consiguiente, de acuerdo con la segunda ley de Newton, también se anula la aceleración de la bolita.

En este instante la velocidad de dicha bolita alcanza su valor máximo. Por eso, en virtud de la inercia, la bolita no se para en la posición de equilibrio, sino que sigue moviéndose hacia la izquierda. Al ocurrir esto, el muelle se acorta. Como resultado aparece una fuerza de elasticidad, dirigida hacia la derecha, que frena el movimiento de la bolita (fig. 3, c). Esta fuerza y, por consiguiente, el módulo de la aceleración dirigida hacia la derecha aumentan, en proporción directa al módulo de la elongación o desplazamiento x de la bolita respecto de su posición de equilibrio. La velocidad, a su vez, va disminuyendo hasta que al llegar a la posición extrema izquierda se anula. Luego la bolita empieza a moverse aceleradamente hacia la derecha. Al disminuir el módulo de la

¹⁾ El análisis de las oscilaciones de una bolita sujeta a un muelle vertical es algo más complicado. En este caso actúan simultáneamente la fuerza variable de la elasticidad del muelle y la fuerza constante de la gravedad. No obstante, el carácter de las oscilaciones en uno y otro caso es exactamente el mismo.

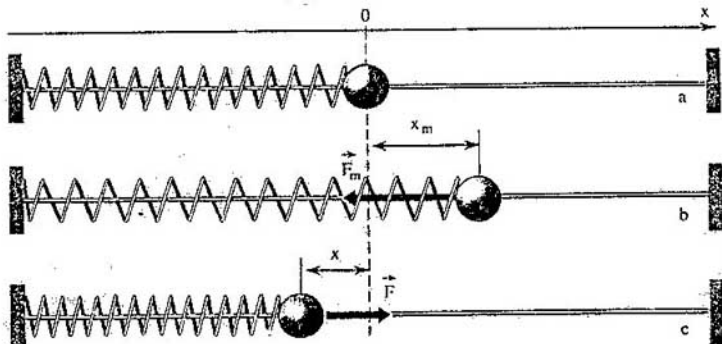


Fig. 3

elongación x , disminuye también el módulo de la fuerza \vec{F} y en la posición de equilibrio vuelve a anularse. Pero la bolita, en este instante, ha tenido tiempo de adquirir velocidad y, por lo tanto, continúa moviéndose hacia la derecha. Este movimiento ocasiona el alargamiento del muelle y la aparición de la fuerza de elasticidad, dirigida hacia la izquierda. El movimiento de la bolita se va decelerando hasta que ésta se para en la posición extrema derecha, después de lo cual se repite el proceso.

Si no existiera rozamiento, el movimiento de la bolita nunca cesaría. Pero el rozamiento existe (en particular por la resistencia del aire) y el sentido de la fuerza de resistencia es siempre contrario al de la velocidad, tanto cuando la bolita se mueve hacia la derecha, como cuando lo hace hacia la izquierda. Por eso el rozamiento frena el movimiento de la bolita y la elongación de sus oscilaciones va disminuyendo poco a poco, hasta que dicho movimiento cesa. Cuando el rozamiento es pequeño, la amortiguación sólo se nota al cabo de muchas oscilaciones. Y si nos interesa el movimiento de la bolita durante un intervalo de tiempo no muy grande, el amortiguamiento de sus oscilaciones se puede despreciar. En este caso la fuerza de resistencia al movimiento puede no tomarse en consideración.

Para que el rozamiento sea menor, cuando la bolita oscila a lo largo de una horizontal, se utiliza el dispositivo representado en la fig. 4. La bolita está sujeta, por medio de una varilla, a la abrazadera de una polca que puede rodar

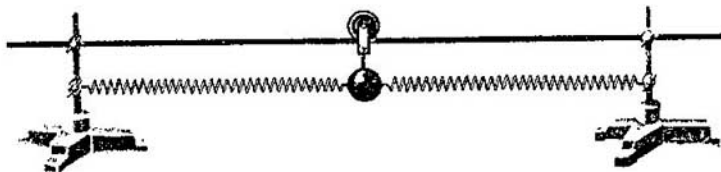


Fig. 4

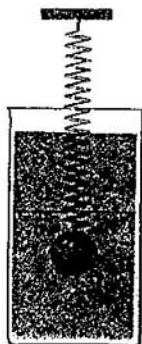


Fig. 5

con poco rozamiento a lo largo de una barra guía. La fuerza de la gravedad que actúa sobre la bolita es compensada en todo momento por la fuerza de elasticidad de la varilla. Las oscilaciones de la bolita se efectúan bajo la acción de las fuerzas de elasticidad de dos muelles.

Si la fuerza de resistencia es grande, su acción, incluso en pequeños intervalos de tiempo, no se puede despreciar. Para cerciorarse, sumerja una bolita suspendida por un muelle en un vaso lleno de líquido viscoso, por ejemplo, glicerina (fig. 5). Si el muelle es suficientemente blando, verá que la bolita, separada de su posición de equilibrio hacia abajo, no oscilará en absoluto. Bajo la acción de la fuerza de elasticidad se limitará a retornar a la posición de equilibrio (línea de trazos en la fig. 5). A causa de la acción de la fuerza de resistencia, su velocidad en la posición de equilibrio será prácticamente nula.

Ahora ya se puede comprender qué es lo esencial para que en un sistema puedan producirse oscilaciones libres. Deben cumplirse dos condiciones. PRIMERA, al desplazar el cuerpo de su posición de equilibrio, en el sistema debe surgir una fuerza dirigida hacia dicha posición y, por lo tanto, tendente a volver el cuerpo a ella. Así, precisamente, actuaba el muelle en el sistema antes examinado: tanto cuando la bolita se desplazaba hacia la izquierda, como cuando lo hacía hacia la derecha, la fuerza de elasticidad estaba dirigida hacia la posición de equilibrio. SEGUNDA, el rozamiento debe ser suficientemente pequeño en el sistema. De lo contrario las oscilaciones se amortiguan rápidamente o incluso no se generan. Las oscilaciones no amortiguadas sólo son posibles en ausencia de rozamiento.

Estas dos condiciones son totalmente generales, válidas para todo sistema en el cual puedan aparecer oscilaciones libres. Vamos a comprobar esto en otro sistema simple, en el péndulo.

1.3. Péndulo simple

Consideremos un péndulo simple, es decir, una bolita pesada suspendida por un hilo largo. Si las dimensiones de la bolita son mucho menores que la longitud del hilo, dichas dimensiones pueden

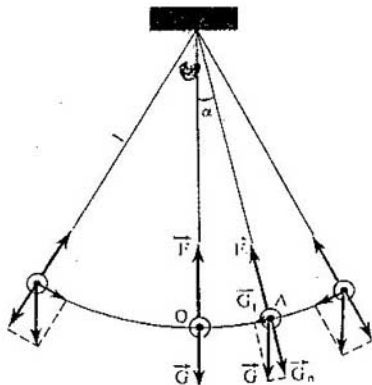


Fig. 6

despreciarse y considerar la bolita como un punto material. El alargamiento del hilo también se puede omitir, ya que será muy pequeño. Asimismo es posible no tomar en consideración la masa del hilo, por su pequeñez en comparación con la de bolita. Por lo tanto, en vez de un péndulo real, o sea, de una bolita de dimensiones determinadas suspendida por un hilo que, por supuesto, se deforma un poco durante el movimiento y que tiene masa, podemos con pleno derecho estudiar el modelo simplificado: un punto material suspendido por un hilo inextensible y carente de peso. Este modelo de péndulo recibe el nombre de *péndulo simple* o *matemático*. Una bolita pequeña suspendida por un hilo fino y largo debe comportarse prácticamente como un péndulo simple. Saquemos este péndulo de su posición de equilibrio y soltémoslo. Sobre la bolita actuarán dos fuerzas: la de la gravedad $\vec{G} = m\vec{g}$, dirigida verticalmente hacia abajo, y la de la elasticidad del hilo \vec{F} , dirigida a lo largo de éste (fig. 6). Es natural que al moverse el péndulo actuará también sobre él la fuerza de la resistencia. Pero vamos a suponer que esta última es tan pequeña que se puede despreciar.

Para imaginarse claramente la dinámica del movimiento del péndulo conviene descomponer la fuerza de la gravedad en dos componentes: la \vec{G}_n , dirigida a lo largo del hilo, y la \vec{G}_1 , dirigida perpendicularmente al hilo, según la tangente a la trayectoria de la bolita. La fuerza de elasticidad del hilo \vec{F} y la componente \vec{G}_n de la fuerza de la gravedad son perpendiculares a la velocidad del péndulo y le comunican una aceleración centrípeta. Esta aceleración está dirigida hacia el centro de un arco de circunferencia, es decir, de la trayectoria del péndulo. El trabajo de estas fuerzas es nulo. Por eso, de acuerdo con el teorema de la energía cinética, no hacen que varíe el módulo de la velocidad del péndulo. Su acción se limita a hacer que el vector velocidad cambie continuamente de dirección, de manera que en todo instante la velocidad tenga la dirección de la tangente al arco de circunferencia. Bajo la acción de la componente \vec{G}_1 , el péndulo comienza a moverse hacia abajo, siguiendo el arco de circunferencia, con una velocidad cuyo módulo va aumentando. A medida que el péndulo se mueve, el módulo de esta componente de la fuerza de la gravedad, dirigida

hacia la posición de equilibrio, disminuye y, en el instante en que el péndulo pasa por dicha posición, se anula. Por efecto de la inercia, el péndulo sigue moviéndose y se eleva. Ahora la componente G_1 , estará dirigida en sentido contrario al de la velocidad. Por lo tanto, el módulo de la velocidad del péndulo irá disminuyendo, además tanto más de prisa, cuanto mayor sea el ángulo entre el hilo y la vertical, ya que, a medida que aumenta este ángulo, dicha componente de la fuerza de la gravedad crece. En el instante en que el péndulo se detiene en el punto más alto, el módulo de la componente G_1 es máximo y dicha componente está dirigida hacia la posición de equilibrio. Después el módulo de la velocidad aumenta y el péndulo vuelve a moverse hacia dicha posición. Una vez que pasa la posición de equilibrio, el péndulo retorna a su punto de partida, si es que la fuerza de la resistencia no es grande y su trabajo durante un pequeño intervalo de tiempo puede despreciarse. Si el péndulo se sumerge en un líquido viscoso se nota inmediatamente que las oscilaciones se interrumpen o se amortiguan con rapidez.

¿ ?

1. ¿Qué oscilaciones se llaman libres? Ponga algunos ejemplos de oscilaciones libres no mencionados en el texto.
2. ¿Qué oscilaciones se denominan forzadas? Cite algunos ejemplos de oscilaciones forzadas.
3. ¿En qué condiciones se producen oscilaciones libres en un sistema?

1.4. Dinámica del movimiento oscilatorio

ECUACIÓN DEL MOVIMIENTO DE UN CUERPO OSCILANTE BAJO LA ACCIÓN DE FUERZAS DE ELASTICIDAD. Para definir cuantitativamente el proceso de las oscilaciones de un cuerpo bajo la acción de fuerza de elasticidad de un muelle o las oscilaciones de una bolita suspendida por un hilo, hay que aplicar las leyes de la mecánica de Newton.

De acuerdo con la segunda ley de Newton, el producto de la masa m del cuerpo por su aceleración \ddot{a} es igual a la resultante \vec{F} de todas las fuerzas aplicadas al cuerpo:

$$m\ddot{a} = \vec{F}. \quad (1.1)$$

Escribamos la ecuación del movimiento para una bolita que se mueva rectilíneamente a lo largo de una horizontal bajo la acción de un muelle (véase la fig. 3). El eje X lo dirigimos hacia la derecha y suponemos que el origen de coordenadas corresponde a la posición de equilibrio (véase la fig. 3, a).

El movimiento a lo largo del eje X viene determinado por la proyección F_x , sobre esta dirección, de la fuerza de elasticidad \vec{F} del muelle. Esta proyección, de acuerdo con la ley de Hooke, es directamente proporcional a la elongación o desplazamiento de la bolita de su posición de equilibrio. La elongación es igual a la coordenada x de la bolita, con la particularidad de que la proyección de la fuerza y la coordenada tienen signos opuestos (véanse las figs. 3, b y c). Por consiguiente,

$$F_x = -kx, \quad (1.2)$$

donde k es la rigidez del muelle.

La ecuación del movimiento de la bolita se escribe así:

$$ma_x = -kx, \quad (1.3)$$

siendo a_x la proyección de la aceleración sobre la dirección del eje X . Dividiendo por m los dos miembros de la ecuación (1.3), se obtiene:

$$a_x = -\frac{k}{m}x. \quad (1.4)$$

Como la masa m y la rigidez k son magnitudes constantes, la relación k/m también lo es. Hemos obtenido la ecuación del movimiento de un cuerpo que oscila bajo la acción de la fuerza de elasticidad. Esta ecuación es muy simple: la proyección a_x de la aceleración del cuerpo es directamente proporcional a su coordenada x tomada con signo contrario.

Lo más notable es que ecuaciones iguales a ésta definen las oscilaciones libres de los más diversos sistemas.

ECUACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL PÉNDULO SIMPLE. Cuando una bolita oscila suspendida por un hilo inextensible, siempre se mueve siguiendo un arco de circunferencia, cuyo radio es igual a la longitud l del hilo. Por eso la posición de la bolita en todo instante queda determinada por una sola magnitud, la elongación, o sea, el ángulo α de desviación del hilo respecto de la vertical. Vamos a considerar que el ángulo α es positivo si el péndulo está desviado hacia la derecha de la posición de equilibrio, y negativo, si lo está hacia la izquierda (véase la fig. 6).

Llamemos G_t a la proyección de la fuerza de la gravedad sobre la tangente a la trayectoria del péndulo. Esta proyección en el instante en que el hilo está desviado de la posición de equilibrio un ángulo α se expresa así:

$$G_t = -G \operatorname{sen} \alpha = -mg \operatorname{sen} \alpha. \quad (1.5)$$

Aquí el signo “-” figura porque G_t y α tienen signos opuestos. Cuando el péndulo se desvía hacia la derecha ($\alpha > 0$), la componente G_t de la fuerza de la gravedad está dirigida hacia la izquierda y su proyección es negativa: $G_t < 0$. Cuando el péndulo se desvía hacia la izquierda ($\alpha < 0$) y dicha proyección es positiva: $G_t > 0$.

Designemos la proyección de la aceleración del péndulo sobre la tangente a su trayectoria por a_t . Esta proyección caracteriza la rapidez con que varía el módulo de la velocidad del péndulo. Esto ya se dijo en el 1.3.

De acuerdo con la segunda ley de Newton

$$ma_t = G_t,$$

o bien

$$ma_t = -mg \operatorname{sen} \alpha. \quad (1.6)$$

Dividiendo por m los dos miembros de esta ecuación, se obtiene:

$$a_t = -g \operatorname{sen} \alpha. \quad (1.7)$$

Hasta ahora se ha supuesto que las elongaciones, es decir, los ángulos de desviación del hilo del péndulo respecto de la vertical, podían ser cualesquiera. En adelante vamos a considerarlos pequeños. Cuando los ángulos son

pequeños, si se miden en radianes,

$$\text{sen } \alpha \approx \alpha.$$

Por lo tanto, se puede admitir que

$$a_1 = -g\alpha. \quad (1.8)$$

Designando la longitud del arco OA por s (véase la fig. 6), se puede escribir:

$$s = \alpha l,$$

de donde

$$\alpha = \frac{s}{l}. \quad (1.9)$$

Sustituyendo α por esta expresión en la igualdad (1.8), resulta:

$$a_1 = -\frac{g}{l}s. \quad (1.10)$$

Esta ecuación tiene la misma forma que la (1.4) del movimiento de la bolita sujeta al muelle. Sólo que aquí, en vez de la proyección de la aceleración a_x , figura la proyección de la aceleración a_1 , y, en vez de la coordenada x , la magnitud s . Además, el coeficiente de proporcionalidad no depende ya de la rigidez del muelle y de la masa de la bolita, sino de la aceleración de caída libre y de la longitud del hilo. Pero, lo mismo que antes, la aceleración es directamente proporcional a la elongación (determinada por el arco) de la bolita.

Hemos llegado a una conclusión sorprendente: las ecuaciones del movimiento que definen las oscilaciones de sistemas tan distintos como una bolita sujeta a un muelle y un péndulo, son iguales. Esto significa que el movimiento de la bolita y las oscilaciones del péndulo transcurren de igual modo. Las elongaciones de la bolita sujeta al muelle y de la bolita del péndulo varían con el tiempo según una misma ley, a pesar de que las fuerzas que producen las oscilaciones tienen distinta naturaleza física. En el primer caso se trata de la fuerza de elasticidad del muelle y en el segundo, de la componente de la fuerza de la gravedad.

La ecuación del movimiento (1.4), lo mismo que la (1.10), exteriormente parece muy simple: la aceleración es directamente proporcional a la coordenada. Pero resolverla, es decir, determinar cómo varía la posición del cuerpo oscilante en el espacio con el tiempo, no es fácil. En "Física 2" se estudió el movimiento uniformemente acelerado. Pero en las oscilaciones la aceleración varía con el tiempo, ya que cambia la fuerza que sobre el cuerpo actúa.

1.5. Oscilaciones armónicas

Sabiendo cómo están relacionadas entre sí la aceleración y la coordenada del cuerpo oscilante, se puede, basándose en el análisis matemático, hallar la dependencia de la coordenada respecto del tiempo.

LA ACELERACIÓN ES LA SEGUNDA DERIVADA DE LA COORDENADA RESPECTO DEL TIEMPO. La velocidad instantánea, como se sabe por el curso de matemáticas, es la derivada de la coordenada respecto del tiempo. La aceleración es, pues, la derivada de la velocidad respecto del tiempo o la segunda derivada de la coordenada respecto del tiempo¹⁾. Por lo tanto, la ecuación (1.4), que define las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle, se puede escribir así:

$$\ddot{x} = -\frac{k}{m}x, \quad (1.11)$$

donde x'' es la segunda derivada de la coordenada respecto del tiempo. De acuerdo con la ecuación (1.11), cuando las oscilaciones son libres, la coordenada x varía con el tiempo de tal manera, que su segunda derivada respecto del tiempo es directamente proporcional a la propia coordenada y tiene signo contrario al de ella.

OSCILACIONES ARMÓNICAS. Por el curso de matemáticas se sabe que las funciones seno y coseno tienen la propiedad de que la segunda derivada de la función es proporcional a la propia función tomada con signo contrario. Puede demostrarse que ninguna otra función posee esta propiedad. Por consiguiente, la coordenada de un cuerpo que efectúa oscilaciones libres varía con el tiempo según la ley del seno o del coseno.

Cuando un cuerpo oscila, su movimiento se repite periódicamente. Por eso no es extraño que la variación con el tiempo de la coordenada del cuerpo se exprese por medio de un seno o de un coseno, que son funciones periódicas.

Las variaciones periódicas de una magnitud física, dependientes del tiempo, que se producen de acuerdo con la ley del seno o del coseno, se llaman oscilaciones armónicas.

Primero vamos a estudiar las variaciones armónicas de una coordenada. Después se darán a conocer las variaciones armónicas de otras magnitudes.

AMPLITUD DE LAS OSCILACIONES. Una característica importante del movimiento oscilatorio es la amplitud.

Se llama amplitud de las oscilaciones armónicas el módulo de su elongación máxima, o sea, del desplazamiento máximo del cuerpo de su posición de equilibrio.

La amplitud puede tener distintos valores, en dependencia de la magnitud en que se desplaza el cuerpo de su posición de equilibrio en el instante inicial y de la velocidad que se le comunica. La amplitud se determina por las condiciones iniciales. Pero los valores máximos del módulo del seno y del coseno son iguales a la unidad. Por lo tanto, la solución de la ecuación (1.11) no se puede expresar simplemente por un seno o un coseno. Debe tener la forma de producto de la amplitud x_m por un seno o un coseno, que deberán ser funciones del tiempo.

SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MOVIMIENTO QUE DESCRIBE LAS OSCILACIONES LIBRES. ¿Qué forma tiene la solución de la ecuación (1.11)? No puede pensarse que sea simplemente $x = x_m \cos t$ o $x =$

¹⁾ Para abreviar, decimos aceleración y velocidad. En realidad nos referimos a las proyecciones de estas magnitudes vectoriales.

$= x_m \sin t$, ya que en este caso, en vez de

$$x'' = -\frac{k}{m}x,$$

se obtendría la igualdad

$$x'' = -x_m \cos t = -x.$$

Pero una pequeña complicación de la forma de esta solución nos conduce al fin deseado. Para que en la expresión de la segunda derivada $x''(t)$ figure el factor k/m , escribiremos la solución de la ecuación (1.11) en la forma siguiente:

$$x = x_m \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t. \quad (1.12)$$

En este caso la primera derivada tomará la forma:

$$x' = -\sqrt{\frac{k}{m}}x_m \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t,$$

y la segunda derivada será

$$x'' = -\frac{k}{m}x_m \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t = -\frac{k}{m}x.$$

Hemos obtenido exactamente la ecuación (1.11). Por consiguiente, la función (1.12) es una solución de la ecuación inicial (1.11). Naturalmente, también será solución de dicha ecuación la función

$$x = x_m \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t.$$

Designemos la magnitud constante $\sqrt{\frac{k}{m}}$, dependiente de las propiedades del sistema, por ω_0 :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (1.13)$$

Entonces la solución de la ecuación (1.11) se puede escribir en forma más compacta:

$$x = x_m \cos \omega_0 t. \quad (1.14)$$

Mientras que la propia ecuación del movimiento (1.11) toma la forma

$$x'' = -\omega_0^2 x. \quad (1.15)$$

La gráfica de la dependencia de la coordenada del cuerpo respecto del tiempo, de acuerdo con (1.14), es la cosinusoide representada en la fig. 7.

PERÍODO Y FRECUENCIA DE LAS OSCILACIONES ARMONICAS.
Veamos ahora qué sentido físico tiene la magnitud ω_0 .

Durante las oscilaciones el movimiento del cuerpo se repite periódicamente.

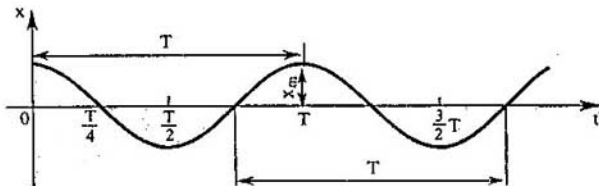


Fig. 7

El *intervalo de tiempo mínimo* T al cabo del cual el movimiento del cuerpo se repite totalmente se denomina *período de las oscilaciones*.

Conociendo el período se puede determinar la *frecuencia de las oscilaciones*, es decir, el número de oscilaciones por unidad de tiempo, por ejemplo, en un segundo. Si la oscilación se cumple en un tiempo T , el número de oscilaciones por segundo ν se determina así:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (1.16)$$

En el sistema internacional de unidades (SI) la frecuencia de las oscilaciones es igual a la unidad si en un segundo se efectúa una oscilación. La unidad de medida de la frecuencia se llama HERTZIO o HERCIO (Hz) en honor del físico alemán Heinrich HERTZ.

Al cabo de un intervalo de tiempo igual al período T , es decir, cuando el argumento del coseno aumenta en $\omega_0 t$, el movimiento se repite y el coseno toma su valor de antes. Pero por las matemáticas sabemos que el período mínimo del coseno es igual a 2π . Por lo tanto,

$$\omega_0 T = 2\pi,$$

de donde

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (1.17)$$

Así, pues, la magnitud ω_0 es el número de oscilaciones del cuerpo, pero no en un segundo, sino en 2π segundos. Esta magnitud recibe el nombre de *frecuencia angular o cíclica*¹⁾.

La frecuencia de las oscilaciones libres se llama *frecuencia propia (o natural) del sistema oscilante*.

DEPENDENCIA DE LA FRECUENCIA Y DEL PERÍODO DE LAS OSCILACIONES LIBRES DE LAS PROPIEDADES DEL SISTEMA. La frecuencia propia de las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle, según

¹⁾ En adelante, para abreviar, llamaremos a menudo simplemente frecuencia a la frecuencia angular. Esta frecuencia ω se podrá distinguir de la frecuencia ν por las letras griegas que las designan.

(1.13), es

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Esta frecuencia resulta tanto mayor cuanto mayor es la rigidez del muelle, y tanto menor, cuanto mayor es la masa del cuerpo. Eso es natural: el muelle rígido comunica al cuerpo una aceleración mayor y la velocidad de éste varía con más rapidez. Y cuanto más masa tiene el cuerpo, tanto más despacio varía su velocidad bajo la influencia de una fuerza dada. El periodo de las oscilaciones es

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (1.18)$$

Si se dispone de un juego de muelles de distinta rigidez y de cuerpos de distinta masa, no es difícil cerciorarse de que las fórmulas (1.13) y (1.18) definen correctamente el carácter de la dependencia de ω_0 y T respecto de k y m .

El coeficiente de proporcionalidad entre la aceleración a , y la elongación s en la ecuación (1.10), que define las oscilaciones del péndulo, es, lo mismo que en la ecuación (1.11), el cuadrado de la frecuencia angular. Por consiguiente, la frecuencia propia del péndulo simple, cuando los ángulos que forma el hilo con la vertical son pequeños, depende de la longitud del péndulo y de la aceleración de caída libre así:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (1.19)$$

Y el periodo de las oscilaciones es

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1.20)$$

Esta fórmula la obtuvo por primera vez y la comprobó el científico holandés, contemporáneo de NEWTON, Christian HUYGENS.

El periodo de las oscilaciones crece al aumentar la longitud del péndulo. De la masa del péndulo no depende el periodo. Esto se puede comprobar fácilmente haciendo experimentos con péndulos distintos. La dependencia del periodo respecto de la aceleración de caída libre también puede detectarse. Cuanto menor sea g , tanto mayor será el periodo de las oscilaciones del péndulo y, por consiguiente, tanto más despacio marcharán los relojes de péndulo. Así, un reloj de péndulo en forma de lenteja, sujeta a una varilla, sufriría un retraso de 3 s diarios si desde el sótano de la Universidad de Moscú lo elevamos a su último piso (que está a 200 m de altura). Esto únicamente ocurriría a costa de la disminución de la aceleración de caída libre con la altura.

La dependencia entre el periodo de las oscilaciones del péndulo y el valor de g se aprovecha en la práctica. Midiendo el periodo de las oscilaciones se puede determinar g con mucha exactitud. La aceleración de caída libre, como se sabe por el curso de "Física 2", varía con la latitud geográfica. Pero incluso en una

latitud dada tampoco es igual en todas partes, ya que la densidad de la corteza terrestre no es la misma en todos los puntos. En las regiones en que yacen rocas densas la aceleración g es algo mayor. Esto se aplica en la prospección de minerales.

Así, el mineral de hierro es más denso que las rocas ordinarias. Por eso las mediciones de la aceleración de caída libre, efectuadas bajo la dirección del académico soviético A.A. MIJÁILOV en las inmediaciones de la ciudad de Kursk, dieron la posibilidad de precisar la ubicación de los importantes yacimientos de hierro de esta zona. Estos yacimientos fueron descubiertos anteriormente por medio de mediciones magnéticas.

Es notable que el período de las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle y el período de las oscilaciones del péndulo, cuando sus elongaciones son pequeñas, no dependan de la amplitud de dichas oscilaciones. Intuitivamente podemos imaginarnos esto como sigue. Si la amplitud se duplica, la fuerza dirigida hacia la posición de equilibrio también se duplica, la aceleración se hace dos veces mayor y el valor de la velocidad adquirida será doble. Como resultado, el camino dos veces más largo hacia la posición de equilibrio del cuerpo será recorrido en el mismo tiempo que durante las oscilaciones con la amplitud inicial (dos veces menor).

1.6. Fase de las oscilaciones

Conocemos ya las principales magnitudes que caracterizan las oscilaciones armónicas: la amplitud x_m de las oscilaciones, el período T , la frecuencia ν y la frecuencia angular ω_0 . Nos queda por conocer otra magnitud importante, la *fase*.

Cuando se da la amplitud de las oscilaciones armónicas, la coordenada del cuerpo oscilante en un instante cualquiera viene determinada unívocamente por el argumento del coseno (o del seno) $\varphi = \omega_0 t$.

La magnitud φ , que se encuentra detrás del signo de coseno o de seno, recibe el nombre de *fase de las oscilaciones definidas por estas funciones*. La fase se mide en unidades angulares, radianes.

La fase no sólo determina el valor de la coordenada, sino además el de otras magnitudes físicas, como la velocidad y la aceleración, que varían también de acuerdo con la ley armónica. Por eso se puede decir que la fase define, cuando se da la amplitud, el estado del sistema oscilante en cualquier momento.

Como $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, obtenimos

$$\varphi = \omega_0 t = 2\pi \frac{t}{T}. \quad (1.21)$$

La relación t/T indica la fracción de período transcurrida desde el instante en que se iniciaron las oscilaciones. A todo valor del tiempo expresado en fracciones de período le corresponde un valor de la fase expresado en radianes. Así, al cabo de un tiempo $t = T/4$ (cuarto de período), $\varphi = \pi/2$; transcurrido medio período, $\varphi = \pi$; después de un período completo, $\varphi = 2\pi$ y así sucesivamente.

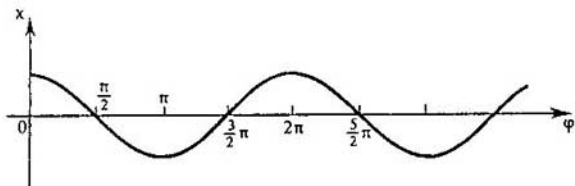


Fig. 8

En una gráfica se puede representar la coordenada de un punto oscilante no en función del tiempo, sino de la fase. En la fig. 8 se muestra la misma cosenoide que en la fig. 7, pero sobre el eje horizontal, en vez del tiempo, se han tomado distintos valores de la fase φ .

ESCRITURA DE LAS OSCILACIONES ARMÓNICAS POR MEDIO DEL COSENO Y DEL SENO. Sabemos que, cuando las oscilaciones son armónicas, la coordenada del cuerpo varía con el tiempo según la ley del seno o del coseno. Después de introducir el concepto de fase hay que detenerse en esto y analizarlo más detalladamente.

El seno se diferencia del coseno en que el argumento está desplazado un cuarto de período es decir, en $\pi/2$.

$$\cos \varphi = \operatorname{sen} \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right). \quad (1.22)$$

Por esta razón, en vez de la fórmula $x = x_m \cos \omega_0 t$, para describir las oscilaciones armónicas se puede utilizar la fórmula

$$x = x_m \operatorname{sen} \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (1.23)$$

Pero entonces la *fase inicial*, o sea, el valor de la fase en el instante $t = 0$, no es nulo, sino igual a $\pi/2$.

Por lo general las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle, o de un péndulo, se excitan sacándolo de su posición de equilibrio y soltándolo. En el instante inicial la elongación es máxima. Por lo tanto, para definir estas oscilaciones es más conveniente utilizar la fórmula (1.14), aplicando el coseno, que la fórmula (1.23), utilizando el seno.

Peró si las oscilaciones del cuerpo en reposo se excitan por medio de un choque de poca duración, la coordenada en el instante inicial será nula y sus oscilaciones convendrá describirlas mediante el seno, es decir, con la fórmula

$$x = x_m \operatorname{sen} \omega_0 t, \quad (1.24)$$

ya que en este caso la fase inicial es nula.

DESPLAZAMIENTO DE FASE. Las oscilaciones definidas por las fórmulas (1.23) y (1.24) sólo difieren entre sí por sus fases. La *diferencia de fase*, o como suele decirse, *el desplazamiento de fase*, o defasaje, de estas oscilaciones

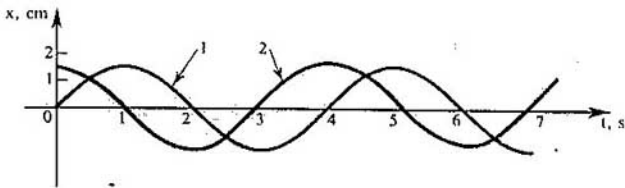


Fig. 9

es $\pi/2$. La fig. 9 muestra las gráficas de las coordenadas en función del tiempo de dos oscilaciones armónicas con un desplazamiento de fase de $\pi/2$. La gráfica 1 corresponde a las oscilaciones que se realizan según la ley sinusoidal

$$x = x_m \operatorname{sen} \omega_0 t,$$

y la gráfica 2, a las oscilaciones efectuadas de acuerdo con la ley cosinusoidal

$$x = x_m \operatorname{sen} \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right) = x_m \operatorname{cos} \omega_0 t.$$

Para determinar la diferencia de fase de dos oscilaciones hay que expresar en ambos casos la magnitud oscilante por medio de la misma función trigonométrica ya sea el seno o bien el coseno.

¿ ?

1. ¿Qué oscilaciones se llaman armónicas?
2. ¿Cómo están relacionadas la aceleración y la coordenada en las oscilaciones armónicas?
3. ¿Cómo está relacionada la frecuencia angular de las oscilaciones con el período?
4. ¿Por qué la frecuencia de las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle depende de la masa del primero, mientras que la frecuencia de las oscilaciones del péndulo no depende de ella?
5. La coordenada de un cuerpo, medida en centímetros, varía con el tiempo del modo siguiente: $x = 3,5 \operatorname{cos} 4\pi t$. ¿A qué son iguales la amplitud de las oscilaciones y su frecuencia angular? ¿A qué es igual la fase de las oscilaciones al cabo de cinco segundos después de iniciarse las oscilaciones?
6. ¿Qué amplitudes tienen y en qué períodos están las tres oscilaciones armónicas, cuyas gráficas vienen representadas en las figuras 9 y 10?

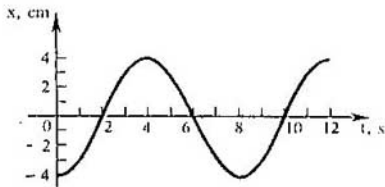


Fig. 10

1.7. Velocidad y aceleración en las oscilaciones armónicas

Cuando las oscilaciones son armónicas, las coordenadas del cuerpo oscilante, su velocidad y su aceleración también varían armónicamente. La proyección de la velocidad sobre el eje X es la derivada de la coordenada x respecto del tiempo. Si $x = x_m \cos \omega_0 t$, será

$$v_x = x' = -\omega_0 x_m \operatorname{sen} \omega_0 t = \omega_0 x_m \cos \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (1.25)$$

La velocidad en las oscilaciones armónicas varía con el tiempo armónicamente, pero las oscilaciones de la velocidad adelantan en fase a las oscilaciones de la coordenada en $\pi/2$.

En el instante en que la coordenada es nula (instante del paso por la posición de equilibrio), el módulo de la velocidad es máximo y, viceversa, la velocidad es nula cuando el módulo de la coordenada es máximo (fig. 11, *a* y *b*). La amplitud v_m de las oscilaciones de la velocidad, es decir, el valor máximo del módulo de la velocidad se expresa mediante la amplitud de las oscilaciones del cuerpo así:

$$v_m = \omega_0 x_m.$$

La proyección de la aceleración sobre el eje X es la derivada de la proyección de la velocidad (véase la fórmula 1.25) respecto del tiempo:

$$a_x = v'_x = -\omega_0^2 x_m \cos \omega_0 t,$$

o bien

$$a_x = \omega_0^2 x_m \cos(\omega_0 t + \pi). \quad (1.26)$$

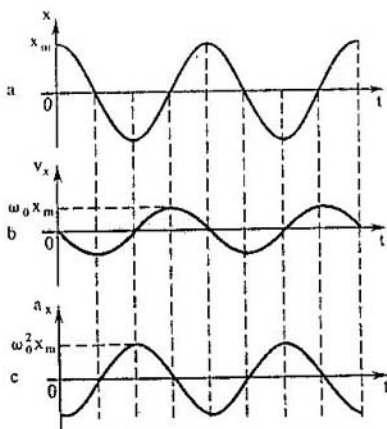


Fig. 11

La aceleración en las oscilaciones armónicas varía armónicamente. La amplitud de la aceleración es $a_m = \omega_0^2 x_m$ y las oscilaciones de la aceleración adelantan en fase a las oscilaciones de la coordenada en π .

La aceleración y la coordenada llegan al mismo tiempo a tener el módulo máximo, pero con signos contrarios. En estos casos se dice que sus oscilaciones se cumplen en oposición de fase (fig. 11, a y c).

Respecto de las oscilaciones de la velocidad, las oscilaciones de la aceleración están desfasadas en $\pi/2$, y la amplitud de la aceleración está relacionada con la de la velocidad por la fórmula

$$a_m = v_m \omega_0.$$

1.8. Transformaciones de la energía en el caso de las oscilaciones armónicas

TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA EN LOS SISTEMAS SIN ROZAMIENTO. Desplazando la bolita sujeta al muelle (véase la fig. 3) hacia la derecha hasta la distancia x_m , comunicamos al sistema oscilante cierta reserva de energía potencial

$$W_{pm} = \frac{kx_m^2}{2}.$$

Al moverse la bolita hacia la izquierda, la deformación del muelle va reduciéndose y la energía potencial disminuye. Pero al mismo tiempo aumenta la velocidad y, por lo tanto, crece la energía cinética. En el instante en que la bolita pasa por la posición de equilibrio la energía potencial es mínima. La cinética alcanza el valor máximo.

Después de pasar la posición de equilibrio la velocidad empieza a decrecer. Por consiguiente, disminuye la energía cinética. La energía potencial, en cambio, vuelve a aumentar. En el punto extremo izquierdo esta energía llega a su máximo y la cinética se anula. De este modo, durante las oscilaciones la energía potencial se transforma en cinética y viceversa. Esto mismo se puede observar en las oscilaciones de un péndulo.

La energía mecánica total, en el caso de las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle, es igual a la suma de las energías cinética y potencial:

$$W = W_c + W_p = \frac{mv_x^2}{2} + \frac{kx^2}{2}. \quad (1.27)$$

Las energías cinética y potencial varían periódicamente. Pero la energía mecánica total de un sistema aislado, en el cual están ausentes las fuerzas de resistencia, permanece, según la ley de conservación de la energía, invariable. Esta energía es igual a la energía potencial, en el instante en que la elongación es máxima, o la energía cinética, en el instante en que el cuerpo pasa por la posición de equilibrio:

$$W = \frac{kx_m^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2}. \quad (1.28)$$

Como

$$v_m = \omega_0 x_m = \sqrt{\frac{k}{m}} x_m.$$

se ve fácilmente que la ecuación (1.28) se cumple realmente.

Por lo tanto, la energía de un cuerpo oscilante es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud de las oscilaciones de la coordenada o al cuadrado de la amplitud de las oscilaciones de la velocidad.

OSCILACIONES AMORTIGUADAS. Las oscilaciones libres de un cuerpo sujeto a un muelle o de un péndulo sólo son armónicas cuando no existe rozamiento. Pero las fuerzas de rozamiento, o más exactamente, de resistencia, aunque pueden ser pequeñas, siempre actúan sobre el cuerpo oscilante.

Las fuerzas de resistencia efectúan trabajo negativo y con ello hacen que disminuya la energía mecánica del sistema. Por eso, con el tiempo, las elongaciones máximas del cuerpo son cada vez menores. Por último, una vez que se agota la reserva de energía mecánica, las oscilaciones cesan por completo. En presencia de fuerzas de resistencia, las oscilaciones son *amortiguadas*.

La gráfica de la coordenada del cuerpo en función del tiempo, cuando las oscilaciones son amortiguadas, se da en la fig. 12. Una gráfica semejante se puede conseguir que la trace el mismo cuerpo que oscila, por ejemplo, un péndulo. En la fig. 13 se representa un péndulo provisto de un embudo con arena. El péndulo va dejando, sobre una hoja de cartón que se desliza uniformemente debajo de él, un reguero de arena que describe la gráfica de la dependencia de la coordenada (elongación) respecto del tiempo. Éste es un procedimiento sencillo de "desarrollar con el tiempo" las oscilaciones, que da una imagen bastante completa del proceso del movimiento oscilatorio. Si la resistencia no es grande, el amortiguamiento de las oscilaciones en el transcurso de varios períodos es pequeño. Pero si a los hilos de suspensión se sujeta una hoja de papel fuerte, para aumentar la fuerza de la resistencia, la amortiguación se hace considerable.

Cuando se conectan los aparatos de medida eléctrica (amperímetro o voltímetro) su aguja indicadora no de inmediato se detiene en la posición de equilibrio correspondiente a un valor determinado de la magnitud medida. Durante algún tiempo oscila. Para no perder demasiado tiempo en precisar las indicaciones, conviene aumentar el amortiguamiento de las oscilaciones de la aguja. Eso se consigue por medio de dispositivos especiales. En particular, si a la aguja se sujeta una plaquita metálica situada entre los polos de un imán, las

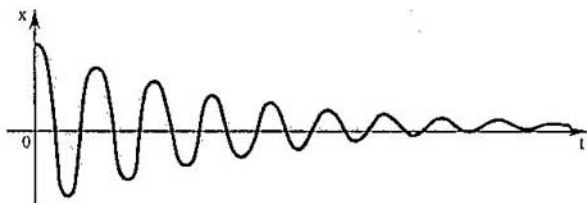


Fig. 12

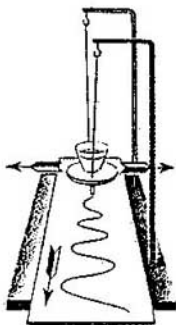


Fig. 13

oscilaciones se amortiguan pronto. Esto se debe a la interacción de las corrientes inducidas en la plaquita con el campo magnético del imán.

En los automóviles se emplean amortiguadores especiales para atenuar las oscilaciones de la carrocería sobre las ballestas durante la marcha por caminos accidentados. Cuando la carrocería oscila, un émbolo unido a ella se mueve dentro de un cilindro lleno de líquido. Este último pasa a través de un agujero que hay en el émbolo, con lo que se producen grandes fuerzas de resistencia y las oscilaciones se amortiguan rápidamente.

¿ ?

1. ¿Cuántas veces aumenta la amplitud de las oscilaciones de la velocidad y de la aceleración, si la frecuencia de las oscilaciones se duplica? La amplitud de las oscilaciones de la coordenada (elongación) permanece invariable.
2. ¿Cómo varían la velocidad y la aceleración en las oscilaciones armónicas durante el tiempo en que el módulo de la coordenada del cuerpo disminuye?
3. Dos péndulos constituidos por bolitas de radios iguales, pero masas distintas, suspendidas por hilos de la misma longitud, oscilan. ¿Qué oscilaciones se amortiguarán antes, las del más liviano o las del más pesado?

1.9. Oscilaciones forzadas. Resonancia

Las oscilaciones libres siempre se amortiguan al cabo de más o menos tiempo.

Por esta razón se utilizan poco en la práctica. Tienen mayor importancia las oscilaciones no amortiguadas (entretenidas) que pueden durar un tiempo ilimitado.

El procedimiento más sencillo de excitar oscilaciones no amortiguadas consiste en que sobre el sistema actúe una fuerza periódica exterior.

Las oscilaciones que se cumplen bajo la acción de una fuerza periódica exterior se llaman forzadas.

El trabajo que realiza dicha fuerza sobre el sistema asegura el aflujo de energía hacia aquél desde fuera. Este aflujo de energía impide que las oscilaciones se amortigüen a pesar de la acción de las fuerzas de rozamiento.

Bajo la influencia de una fuerza periódica cualquier cuerpo o sistema realizará oscilaciones. Oscilaciones de este tipo efectúan, por ejemplo, los tamices de distintas máquinas clasificadoras.

Tienen especial interés las oscilaciones forzadas en un sistema capaz de efectuar oscilaciones libres. Este caso lo conoce todo aquel que haya tenido ocasión de mecer un niño en un columpio.

Un columpio es un péndulo, es decir, un sistema que posee determinada frecuencia propia. Desviar un columpio de su posición de equilibrio un gran ángulo ejerciendo sobre él una fuerza pequeña constante con el tiempo, es imposible. Una persona adulta tampoco conseguirá que el columpio se balancee si lo empuja desordenadamente en ambos sentidos. Pero si, con ritmo regular, empieza a empujarlo hacia adelante cada vez que pasa por su lado, sin hacer gran esfuerzo logrará que el balanceo llegue a ser muy grande. Verdad es que para eso se necesitará cierto tiempo. Cada impulso por separado puede ser insignificante. Después del primero el columpio efectuará oscilaciones muy pequeñas. Pero si el ritmo de estas oscilaciones y el de los impulsos exteriores coinciden, el segundo empuje se producirá a tiempo y reforzará la acción del primero. El tercero ampliará aún más las oscilaciones y así sucesivamente. Las acciones de los impulsos por separado se van acumulando y, como resultado, la amplitud de las oscilaciones del columpio se hace grande. No obstante, si los impulsos por separado se suceden a destiempo, la acción de uno será contrarrestada por la del siguiente y el efecto no se notará.

Esta posibilidad de aumentar considerablemente la amplitud de las oscilaciones de cualquier sistema capaz de efectuar oscilaciones libres, si la frecuencia de la fuerza exterior periódica coincide con la frecuencia propia del sistema oscilante, ofrece especial interés.

OSCILACIONES FORZADAS DE UNA BOLITA SUJETA A UN MUELLE. Consideremos las oscilaciones forzadas en un sistema que posea frecuencia propia de oscilación. En vez de un péndulo conviene más tomar una bolita sujeta a dos muelles. Supongamos que el extremo de uno de ellos está sujeto a su vez a un hilo apoyado en una polea (fig. 14). El otro extremo de este hilo se sujeta por medio de un pasador a un disco. Si el disco se hace girar con un motor eléctrico, sobre la bolita empieza a actuar una fuerza periódica exterior.

La bolita comienza a balancearse. La amplitud de las oscilaciones va aumentando. Al cabo de cierto tiempo las oscilaciones adquieren carácter estable; su amplitud deja de variar con el tiempo. Prestando atención se observa que la frecuencia de las oscilaciones de la bolita es exactamente igual a la frecuencia de las oscilaciones del extremo del muelle, es decir, a la frecuencia con que varía la fuerza exterior. (Esta frecuencia es igual al número de revoluciones del disco por minuto.)

RESONANCIA. En las oscilaciones forzadas estables la frecuencia de oscilación es igual a la frecuencia de la fuerza exterior.

Utilizando el dispositivo representado en la fig. 14, vamos a aclarar cómo la amplitud de las oscilaciones forzadas estables depende de la frecuencia.

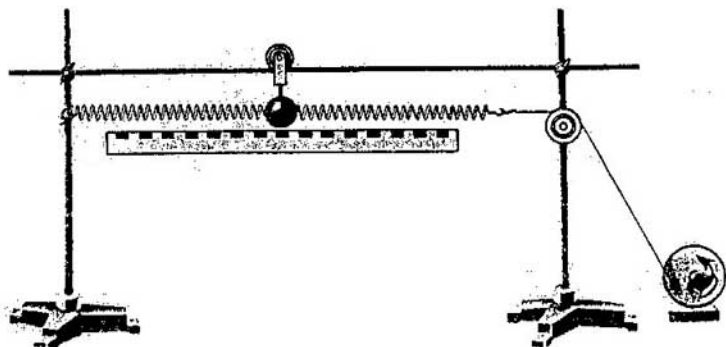


Fig. 14

Incrementando suavemente la frecuencia de la fuerza exterior, notamos que la amplitud de las oscilaciones crece. Esta amplitud llega al máximo cuando la fuerza exterior actúa al compás de las oscilaciones libres de la bolita. Exactamente del mismo modo la amplitud de las oscilaciones de un columpio alcanza el máximo cuando se le empuja con una frecuencia igual a la de sus oscilaciones libres.

Si la frecuencia sigue aumentando, la amplitud de las oscilaciones estables vuelve a ser menor. La dependencia de la amplitud de las oscilaciones respecto de la frecuencia se representa en la fig. 15. Cuando las frecuencias de la fuerza exterior son muy grandes, la amplitud tiende a cero, ya que el cuerpo, a causa de su inercia, como no tiene tiempo de desplazarse apreciablemente durante los pequeños intervalos de éste, "tiembla en su sitio".

El crecimiento brusco de la amplitud de las oscilaciones forzadas, al

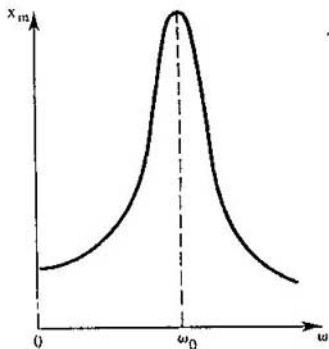


Fig. 15

coincidir la frecuencia con que varía la fuerza exterior que actúa sobre el sistema y la frecuencia de las oscilaciones libres, se llama resonancia¹¹.
 ¿Por qué se produce la resonancia? Este fenómeno puede explicarse partiendo de razonamientos energéticos.

En resonancia es máxima la amplitud de las oscilaciones forzadas porque se crean las condiciones más favorables para la transmisión de energía de la fuente exterior de fuerza periódica al sistema. La fuerza exterior en resonancia actúa al compás de las oscilaciones libres. Durante todo el período su sentido coincide con el de la velocidad del cuerpo oscilante. Por eso, durante todo el período, dicha fuerza realiza únicamente trabajo positivo. Cuando las oscilaciones son estables, el trabajo positivo de la fuerza exterior es igual, en módulo, al trabajo negativo de la fuerza de resistencia, siendo ésta proporcional a la velocidad del movimiento del cuerpo.

Si la frecuencia de la fuerza exterior no es igual a la frecuencia propia ω_0 de las oscilaciones del sistema, la fuerza exterior sólo realiza trabajo positivo durante una parte del período. Durante el resto del período la fuerza está dirigida en sentido opuesto a la velocidad y su trabajo es negativo. En total el trabajo de la fuerza exterior durante el período es pequeño y, respectivamente, también es pequeña la amplitud de las oscilaciones estables.

AMPLITUD DE LAS OSCILACIONES EN RESONANCIA. Una influencia importante sobre la resonancia ejerce el rozamiento en el sistema. Durante la resonancia el trabajo positivo de la fuerza exterior se emplea totalmente en cubrir los gastos de energía debidos al trabajo negativo de la fuerza de resistencia.

Cuando las velocidades del movimiento son pequeñas, el módulo de la fuerza de rozamiento es directamente proporcional al módulo de la velocidad del movimiento. Por lo tanto, se puede escribir:

$$\vec{F}_{roz} = -\mu\vec{v},$$

donde μ es el coeficiente de rozamiento y el signo "menos" indica que el sentido de la fuerza de rozamiento es contrario al de la velocidad.

Pero el módulo del trabajo de la fuerza de rozamiento será igual al módulo del trabajo de la fuerza exterior en el mismo camino recorrido, si la amplitud de la fuerza de rozamiento, igual a μv_m , y la amplitud F_m de la fuerza exterior son iguales, es decir, cuando se cumple la condición

$$\mu v_m = \mu \omega_0 x_m = F_m.$$

De aquí, la amplitud de las oscilaciones forzadas en resonancia se determina así:

$$x_m = \frac{F_m}{\mu \omega_0}.$$

¹¹ En la realidad, debido a la influencia del rozamiento, la resonancia se produce cuando la frecuencia de la fuerza exterior es aún algo menor que la frecuencia propia del sistema oscilante.

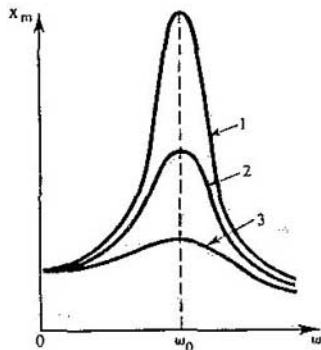


Fig. 16

Cuanto menor sea el coeficiente de rozamiento, tanto mayor será la amplitud de las oscilaciones estables.

La variación de la amplitud de las oscilaciones en función de la frecuencia para distintos coeficientes de rozamiento y una misma amplitud de la fuerza exterior se representa en la fig. 16. La curva 1 corresponde al rozamiento mínimo, y la 3, al máximo. En esta figura se ve bien que el aumento de la amplitud de las oscilaciones forzadas en resonancia se manifiesta tanto más claramente, cuanto menor es el rozamiento en el sistema.

Cuando el rozamiento es pequeño, la resonancia es "aguda", y cuando es grande, "obtusa". Si la frecuencia de las oscilaciones está lejos de la correspondiente a la resonancia, la amplitud de las oscilaciones es pequeña y casi no depende de la fuerza de resistencia en el sistema.

En un sistema con pequeño rozamiento la amplitud de las oscilaciones en resonancia puede ser muy grande, incluso en el caso en que la fuerza exterior sea pequeña. Pero la gran amplitud sólo se establecerá al cabo de bastante tiempo de haber comenzado a actuar la fuerza exterior. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, una fuerza exterior pequeña sólo puede comunicar al sistema una gran amplitud de oscilación y, por lo tanto, una gran energía, en un intervalo de tiempo grande. Si el rozamiento es grande, la amplitud de las oscilaciones será pequeña y para que las oscilaciones se establezcan no será necesario mucho tiempo.

De la resonancia tiene sentido hablar si la amortiguación de las oscilaciones libres del sistema es pequeña. De lo contrario la amplitud de las oscilaciones forzadas $\omega = \omega_0$ difiere poco de la de las oscilaciones con otras frecuencias.

1.10. Aplicaciones de la resonancia y lucha contra ella

Si un sistema oscilante cualquiera se encuentra bajo la acción de una fuerza periódica exterior, puede comenzar la resonancia y el aumento brusco de la amplitud de las oscilaciones que con ella se produce.

Todo cuerpo elástico, sea un puente, la bancada de una máquina, un árbol o el casco de un buque, es un sistema oscilante y se caracteriza por tener frecuencias propias de oscilación. Durante el funcionamiento de los motores a menudo surgen esfuerzos periódicos debidos al movimiento de las partes del motor (por ejemplo, de los émbolos) o a que el centrado de las piezas giratorias (como los árboles) no es exacto. Si la frecuencia de los esfuerzos periódicos coincide con la frecuencia de las oscilaciones propias, se produce la resonancia. Las oscilaciones pueden crecer tanto, que ocasionen la rotura de la máquina, aunque la tensión en el material no supere el límite de rotura para las cargas estáticas. Esto se explica porque el hierro, el acero y otros materiales, cuando las cargas son variables, pierden su resistencia mecánica más o menos pronto y se rompen de repente.

En todos estos casos se toman medidas especiales para impedir que se produzca la resonancia o para debilitar su acción. Para esto se aumenta el rozamiento en el sistema o se procura que las frecuencias propias de sus oscilaciones no coincidan con la frecuencia de la fuerza exterior. Se conocen casos en los cuales ha habido que reconstruir trasatlánticos para disminuir su vibración.

Al pasar los puentes se prohíbe a las unidades militares llevar el paso. El ritmo de la marcha de los soldados provoca una acción periódica sobre el puente. Si por casualidad la frecuencia de esta acción coincide con la frecuencia propia de las oscilaciones del puente, éste puede romperse.

Hemos puesto unos ejemplos de consecuencias perniciosas de la resonancia. Pero también las hay útiles, como, por ejemplo, en el caso del columpio.

En el fenómeno de la resonancia se basa el *frecuencímetro*, aparato que sirve para medir la frecuencia de la corriente alterna. Este aparato consta de un juego de plaquitas elásticas con pequeñas masas pendulares en sus extremos. Las plaquitas están sujetas en voladizo sobre un listón común (fig. 17). Cada plaquita posee una determinada frecuencia propia de oscilación, que depende de sus propiedades elásticas, de su longitud y masa.

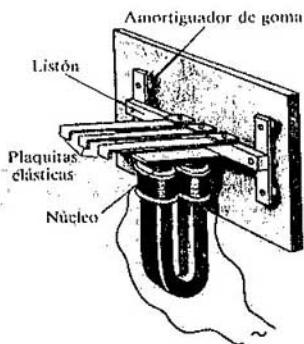


Fig. 17

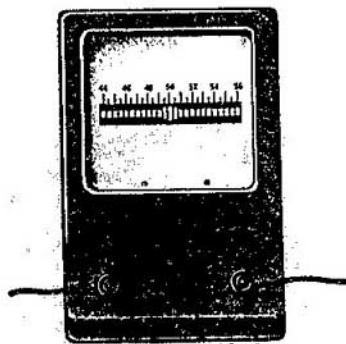


Fig. 18

Las frecuencias propias de oscilación de las plaquitas son conocidas. Bajo la acción de un electroimán, el listón, y con él todas las plaquitas, efectúan oscilaciones forzadas. Pero únicamente las de aquellas plaquitas cuya frecuencia propia de oscilación coincide con la frecuencia de las oscilaciones del listón tendrán gran amplitud (fig. 18). Esto permite determinar la frecuencia de la corriente alterna.

Otras muchas aplicaciones de la resonancia, cuya importancia es mucho mayor, se darán a conocer más adelante.

1.11. Autooscilaciones

Las oscilaciones forzadas no amortiguadas se mantienen en el sistema por la acción de la fuerza periódica exterior. Pero este procedimiento no es el único posible para obtener oscilaciones entretenidas.

Supongamos que dentro de un sistema capaz de efectuar oscilaciones libres existe una fuente de energía. Si el propio sistema oscilante regula el suministro de energía al cuerpo que oscila, para compensar las pérdidas por rozamiento, en él pueden producirse oscilaciones no amortiguadas.

Un sistema simple de este tipo es el reloj de péndulo ordinario. Este sistema posee una reserva de energía determinada: la energía potencial de las pesas subidas o del muelle tenso. Las pesas hacen que gire la rueda de escape (o de Santa Catalina), de dientes oblicuos (fig. 19). Al péndulo va sujeta rigidamente una pieza arqueada *ab*, llamada áncora, con dos salientes o uñas en los extremos. Por medio del áncora el péndulo regula la rotación de la rueda de escape y de las agujas del reloj, que están ligadas con ella. Con esto la energía de las pesas va transmitiéndose en porciones al péndulo.

En la posición representada en la figura, el diente de la rueda de escape presiona sobre el bisel de la uña *b* del áncora, la sube y empuja el péndulo hacia la izquierda. Una vez pasada la posición de equilibrio, la uña *b* se desliza del diente, pero casi inmediatamente el áncora, con su uña *a*, se apoya en otro



Fig. 19

diente de la rueda de escape y el péndulo recibe el impulso hacia el otro lado. Como resultado, dos veces por período el péndulo recibe energía, abriendo y cerrando él mismo el paso a la energía de la fuente.

Las oscilaciones no amortiguadas del péndulo se efectúan con una frecuencia casi igual a la de sus oscilaciones libres, si el rozamiento es pequeño. Por eso precisamente los relojes tienen una marcha regular. El primero en utilizar el péndulo para conseguir la marcha regular de un reloj fue Ch. Huygens, en 1657. En los relojes con muelle motor, en vez del péndulo se utiliza generalmente el volante (ruedecilla con muelle capilar en espiral), que realiza oscilaciones torsionales alrededor de su eje.

Los sistemas, como el reloj, en los cuales se generan oscilaciones no amortiguadas, a expensas del suministro de energía de una fuente, se llaman *sistemas autooscilantes*. A estos sistemas pertenecen el timbre eléctrico con interruptor, el tubo de órgano, el silbato y muchos otros. Nuestro corazón y pulmones también pueden considerarse como sistemas autooscilantes.

Las oscilaciones no amortiguadas, que pueden existir en un sistema sin que sobre él actúen fuerzas periódicas exteriores, se llaman autooscilaciones.

Mientras que la frecuencia de las oscilaciones forzadas coincide con la frecuencia de la fuerza exterior y la amplitud de las oscilaciones depende de la amplitud de esta fuerza, la frecuencia y la amplitud de las autooscilaciones quedan definidas por las propiedades del propio sistema. Las autooscilaciones difieren también de las oscilaciones libres en que, PRIMERO, no se amortiguan con el tiempo, y, SEGUNDO, su amplitud no depende de la magnitud de la acción inicial de corta duración ("impulso") que excita las oscilaciones.

* * *

Terminamos el estudio de las oscilaciones (vibraciones) mecánicas. Debe prestarse atención a un rasgo común de todas las oscilaciones, que las distingue de otras formas de movimiento mecánico.

Por regla general, cuando se estudia el movimiento mecánico de un cuerpo (como, por ejemplo, el movimiento de una nave espacial o de un planeta bajo la influencia de la atracción universal) el problema consiste en hallar la posición del cuerpo y su velocidad en cualquier instante. Pero cuando se estudian los procesos oscilatorios periódicos, lo que más interesa son los rasgos generales, que caracterizan la repetición del movimiento, y no la posición y la velocidad del cuerpo oscilante en un instante cualquiera. Importa conocer la amplitud y el período de las oscilaciones, o sea, las magnitudes que caracterizan el proceso en conjunto. Cuando las oscilaciones son forzadas hay que conocer la relación entre las frecuencias de la fuerza impulsora y de las oscilaciones libres. Ella precisamente define el carácter del proceso, su intensidad.

¿ ?

1. ¿Ha tenido ocasión de observar el fenómeno de la resonancia en su casa o en la calle?
2. Para mantener abierta una puerta del vestíbulo del metro de Moscú (dicha puerta se abre en los dos sentidos y retorna a la posición de equilibrio por la acción de muelles) hay que aplicar al asidero de la misma una fuerza de aproximadamente 50 N. ¿Se podrá abrir dicha puerta aplicando al mismo asidero una fuerza de 0,005 N? El rozamiento en los goznes de la puerta se menosprecia.

- ¿Qué condición es necesaria para que las propiedades de resonancia de un sistema oscilante se manifiesten con claridad?
- Ponga ejemplos de sistemas autooscilantes que no fueron mencionados en el texto.
- ¿En qué difieren las autooscilaciones de las oscilaciones forzadas y de las libres?

Ejemplos de resolución de problemas

PROBLEMA 1. ¿Cuántas oscilaciones n realiza un péndulo simple de longitud $l = 4,9$ m en el tiempo $t = 5$ min?

Solución. El periodo de las oscilaciones se determina por la fórmula

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

El número de oscilaciones que se busca se halla así:

$$n = \frac{t}{T} = \frac{t}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

$$n \approx 68.$$

PROBLEMA 2. Un muelle suspendido verticalmente, tensado por un cuerpo sujeto a él, se estira una longitud $x = 0,8$ cm. ¿A qué es igual el periodo T de las oscilaciones libres del cuerpo? La masa del muelle se desprecia.

Solución. El periodo de las oscilaciones del cuerpo sujeto al muelle se halla por la fórmula

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

en la que m es la masa del cuerpo y k , la rigidez del muelle. Sobre el cuerpo actúan la fuerza de la gravedad G y la fuerza de elasticidad F . Cuando el cuerpo se halla en reposo estas fuerzas se compensan entre sí, es decir, sus módulos son iguales:

$$G = F.$$

Y como $G = mg$ y $F = kx$ (ley de Hooke), resulta que

$$mg = kx,$$

de donde

$$\frac{m}{k} = \frac{x}{g}.$$

Por consiguiente,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{x}{g}},$$

$$T \approx 0,2 \text{ s.}$$

PROBLEMA 3. Por una varilla horizontal puede deslizarse un cuerpo cuya masa $m = 4$ kg. Este cuerpo está sujeto a un muelle (véase la fig. 3) cuya rigidez es de 225 N/m. El otro extremo del muelle está fijo. En cierto instante inicial se desplaza el cuerpo de su posición de equilibrio hasta una distancia $x_m = 10$ cm y se suelta. Determinar la coordenada (elongación) del cuerpo, la proyección de su velocidad y su aceleración al cabo de $1/8$ de período de oscilación después de dicho instante inicial. El rozamiento no se toma en consideración.

Solución. La dependencia de la coordenada (elongación) del cuerpo respecto del tiempo se expresa así:

$$x = x_m \cos \omega_0 t.$$

Como $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ y $t = \frac{T}{8}$, resulta que

$$x = x_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{8}\right) = x_m \cos \frac{\pi}{4},$$

$$x \approx 0,071 \text{ m.}$$

Para la proyección de la velocidad del cuerpo se obtiene:

$$v_x = \omega_0 x_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) = -\sqrt{\frac{k}{m}} x_m \sin \frac{\pi}{4},$$

$$v_x \approx -0,53 \text{ m/s.}$$

La proyección de la aceleración se puede hallar como sigue:

$$a_x = -\omega_0^2 x = -\frac{k}{m} x,$$

$$a_x \approx -4 \text{ m/s}^2.$$

PROBLEMA 4. Hallar el período de las oscilaciones de una botella que flota en la superficie del agua en posición vertical, si su masa $m = 200$ g el área de su sección transversal $S = 50$ cm².

Solución. Cuando la botella flota libremente, las fuerzas de la gravedad y de Arquímedes que actúan sobre ella se equilibran mutuamente, o sea, su resultante es nula. Pero si la botella se desplaza de su posición de equilibrio (hacia arriba o hacia abajo) una distancia x , la fuerza resultante no será nula.

Su proyección sobre el eje vertical se expresa por la fórmula

$$F_x = -\rho g S x,$$

en la que ρ es la densidad del agua. El signo "menos" indica que el sentido de la fuerza resultante es contrario al desplazamiento de la botella. De acuerdo con la segunda ley de Newton

$$a_x = \frac{F_x}{m}.$$

Por consiguiente,

$$a_x = -\frac{\rho g S}{m} x.$$

Esta ecuación define las oscilaciones armónicas, que se realizan con la frecuencia angular

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\rho g S}{m}}.$$

El período T de las oscilaciones armónicas de la botella se halla así:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\rho g S}},$$

$$T \approx 0,4 \text{ s.}$$

PROBLEMA 5. Un cuerpo, sujeto a un muelle, oscila deslizándose por una varilla horizontal lisa (véase la fig. 3). Hallar la razón de la energía cinética del cuerpo a la energía potencial del sistema en el instante en que dicho cuerpo se encuentra en un punto situado a la mitad de la distancia entre su posición extrema y la de equilibrio.

Solución. La coordenada del punto indicado es igual a la mitad de la amplitud de las oscilaciones: $x = x_m/2$. La energía potencial del sistema en el instante en que el cuerpo pasa por este punto es

$$W_p = \frac{kx^2}{2} = \frac{kx_m^2}{8}.$$

Pero en todo instante, según la ley de conservación de la energía, se cumple la igualdad

$$W_c + W_p = \frac{kx_m^2}{2}.$$

De donde la energía cinética del cuerpo en el instante en que pasa por el punto dado se determina así:

$$W_c = \frac{kx_m^2}{2} - W_p = \frac{kx_m^2}{2} - \frac{kx_m^2}{8} = \frac{3}{8} kx_m^2.$$

Por consiguiente,

$$\frac{W_c}{W_p} = 3.$$

Ejercicio

1

1. Un cuerpo de masa $m = 100$ g oscila con la frecuencia $\nu = 2$ Hz bajo la acción de un muelle. Hallar la rigidez k del muelle.
2. La longitud del péndulo de Foucault en la catedral de San Isaac de Leningrado es de 98 m. ¿A qué es igual el período de las oscilaciones de este péndulo?

3. Un péndulo efectúa $n_1 = 10$ oscilaciones. Otro péndulo, en el mismo tiempo que el primero, realiza $n_2 = 6$ oscilaciones. La diferencia entre las longitudes de ambos péndulos es $\Delta l = 16$ cm. Hallar las longitudes l_1 y l_2 de dichos péndulos.
4. ¿Cómo variaría el periodo de las oscilaciones de un péndulo si se trasladara de la Tierra a la Luna? La masa de la Luna es 81 veces menor que la de la Tierra y el radio de esta última es 3,7 veces mayor que el de la Tierra.
5. Una bolita suspendida por un hilo se desvía de su posición de equilibrio un ángulo pequeño y se suelta. Otra bolita cae libremente, sin velocidad inicial, desde el punto de suspensión del hilo. ¿Cuál de las dos bolitas llegará antes a la posición de equilibrio de la primera, si empezaron a moverse al mismo tiempo?
6. Una bolita sujeta a un muelle se desplaza hasta la distancia de 1 cm de su posición de equilibrio y se suelta. ¿Qué camino recorrerá la bolita en 2 s, si la frecuencia de sus oscilaciones $\nu = 5$ Hz? La amortiguación de las oscilaciones se puede despreciar.
7. La coordenada de un cuerpo que efectúa oscilaciones armónicas a lo largo del eje X varía de acuerdo con la ley $x = 5 \cos 2\pi t$. La coordenada se mide en centímetros y el tiempo en segundos. Determinar la amplitud de las oscilaciones de la velocidad y la proyección de ésta sobre el eje en el instante en que la fase de las oscilaciones de la coordenada es igual a $(5/6)\pi$.
8. Un cuerpo de masa igual a 200 g oscila en el plano horizontal, con una amplitud de 2 cm, bajo la acción de un muelle cuya rigidez es de 16 N/m. Determinar la frecuencia angular de las oscilaciones de este cuerpo, la energía del sistema y la amplitud de las oscilaciones de la velocidad.
9. Por el fondo, en forma de casquete esférico, de un platillo oscila, deslizándose sin rozamiento, un cubo pequeño (fig. 20). ¿Cuál será el periodo de sus oscilaciones, si el radio de curvatura del fondo del platillo es R ?
10. Un automóvil marcha por un camino accidentado en el cual la distancia entre montículos es igual, aproximadamente, a 8 m. El periodo de las oscilaciones libres del automóvil sobre sus ballestas es de 1,5 s. ¿A qué velocidad del automóvil sus oscilaciones en el plano vertical se notarán más?
11. Bajo la acción de una fuerza constante F , una bolita sujeta al extremo de un muelle, cuya rigidez es de 16 N/m, se desplaza 1 cm. ¿Cuál sería la amplitud de las oscilaciones forzadas de dicha bolita en resonancia, si sobre ella actuara una fuerza exterior periódica $F \cos \omega t$, siendo la masa de la bolita igual a 0,36 kg? El coeficiente de rozamiento del sistema $\mu = 0,24$ kg/s.

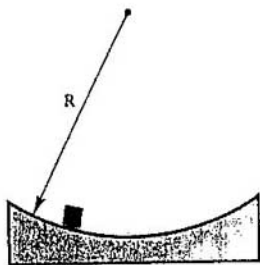


Fig. 20

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 1

Las oscilaciones (vibraciones) de distinta naturaleza (mecánicas, eléctricas, etc.) se definen por leyes cuantitativas iguales. Existen oscilaciones libres, forzadas y autooscilaciones.

Las oscilaciones libres se generan en el sistema bajo la influencia de las fuerzas interiores, una vez que éste ha sido sacado de su posición de equilibrio. Pueden efectuarse oscilaciones mecánicas libres, por ejemplo, un cuerpo sujeto a un muelle y un péndulo. Con el tiempo las oscilaciones libres se amortiguan a causa del rozamiento.

Las oscilaciones forzadas se producen cuando sobre el sistema actúa una fuerza periódica exterior. Estas oscilaciones no se amortiguan mientras actúa la fuerza exterior. Un ejemplo de oscilaciones forzadas es el balanceo de un columpio empujado periódicamente.

Las oscilaciones no amortiguadas (o entretenidas) que pueden existir en un sistema sobre el cual no actúan fuerzas exteriores, se llaman autooscilaciones. Las oscilaciones en el sistema autooscilante se entretienen en este caso a expensas de la energía que proporciona una fuente que se encuentra dentro de él. Un ejemplo de sistema autooscilante es el reloj.

Las oscilaciones libres de un cuerpo sujeto a un muelle se definen por la segunda ley de Newton; con arreglo a este caso dicha ley toma la forma:

$$x'' = -\omega_0^2 x,$$

donde x es la elongación del cuerpo; x'' , su aceleración; ω_0^2 , una constante dependiente de las propiedades del sistema. Una ecuación exactamente igual define las oscilaciones del péndulo simple.

La solución de la ecuación que define las oscilaciones libres se expresa por medio del coseno o del seno:

$$x = x_m \cos \omega_0 t \quad \text{o} \quad x = x_m \sin \omega_0 t.$$

Las oscilaciones que se cumplen según la ley del coseno o del seno se llaman armónicas.

La elongación máxima x_m se denomina amplitud de las oscilaciones. La magnitud ω_0 recibe el nombre de frecuencia angular (o cíclica) de las oscilaciones y se expresa mediante el número de oscilaciones por segundo ν así:

$$\omega_0 = 2\pi\nu.$$

El intervalo de tiempo mínimo al cabo del cual el movimiento del cuerpo se repite totalmente se llama periodo de las oscilaciones. El periodo puede expresarse por medio de la frecuencia angular del modo siguiente:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}.$$

A la magnitud que va detrás del signo de coseno o de seno se le da el nombre de fase de las oscilaciones. La fase determina el estado del cuerpo oscilante en un instante cualquiera para una amplitud dada de las oscilaciones.

La frecuencia angular propia (o natural) de las oscilaciones de un cuerpo

sujeto a un muelle depende de su masa m y de la rigidez del muelle k :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

La frecuencia propia de las oscilaciones de un péndulo simple se determina por la fórmula

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}},$$

en la que g es la aceleración de caída libre; l , la longitud del péndulo. La frecuencia (y el período) de las oscilaciones no depende de sus amplitudes.

La energía del cuerpo oscilante, en ausencia de fuerzas de rozamiento, permanece invariable:

$$E = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2} = \frac{kx_m^2}{2}.$$

Las oscilaciones forzadas ofrecen especial interés en el caso en que una fuerza periódica actúa sobre un sistema en el cual pueden producirse oscilaciones libres. En este caso se observa la resonancia, es decir, el brusco crecimiento de la amplitud de las oscilaciones forzadas cuando coinciden la frecuencia con que varía la fuerza exterior y la frecuencia propia del sistema oscilante. La resonancia sólo se manifiesta claramente en los sistemas con poco rozamiento.

2.1. Oscilaciones eléctricas libres y forzadas

Las oscilaciones eléctricas fueron descubiertas, en cierto modo, casualmente. Después de inventar la botella de Leyden (primer condensador) y de haber aprendido a comunicarle gran carga por medio de una máquina electrostática, se comenzó a estudiar la descarga eléctrica de la botella. Cerrando el circuito de las armaduras de la botella de Leyden mediante una bobina de alambre, se descubrió que los rayos de acero adentro de la bobina se imanaban. Esto no era extraño: la corriente eléctrica precisamente tiene que imanar el núcleo de acero de la bobina. Lo sorprendente era que no se podía predecir qué extremo del núcleo de la bobina resultaría ser el polo positivo y cuál el negativo. Repitiendo el experimento en las mismas condiciones, aproximadamente, se obtenía en unos casos un resultado y en otros, el contrario. No fue fácil comprender que al descargarse el condensador a través de la bobina se producen oscilaciones. Durante la descarga el condensador tiene tiempo de recargarse muchas veces y la corriente cambia de sentido también muchas veces. A esto se debe el hecho de que el núcleo pueda imanarse de distintas formas.

Las oscilaciones periódicas o casi periódicas de la carga, de la intensidad de la corriente y de la tensión se llaman oscilaciones eléctricas.

Las oscilaciones eléctricas se consiguen casi con la misma facilidad con la que se hace que un cuerpo oscile colgándolo de un muelle. Pero observar las oscilaciones eléctricas no es tan fácil, porque no podemos ver directamente cómo se recarga el condensador ni la corriente que pasa por la bobina. Además, estas oscilaciones se efectúan de ordinario con una frecuencia muy grande.

Para observar y estudiar las oscilaciones eléctricas el aparato más apropiado es el oscilógrafo electrónico.

En el tubo catódico del oscilógrafo un estrecho haz de electrones incide sobre una pantalla capaz de emitir luz al ser bombardeada por los electrones.

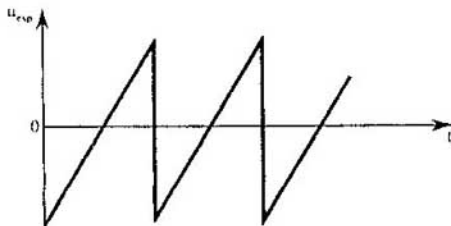


Fig. 21



Fig. 22

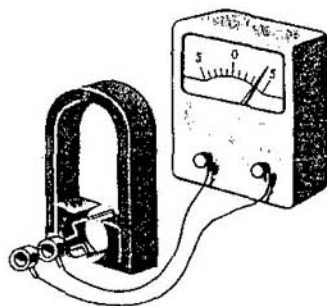


Fig. 23

A las placas de desviación horizontales se hace llegar una corriente alterna de exploración u_{exp} "en diente de sierra" (fig. 21). La tensión aumenta con relativa lentitud y después disminuye bruscamente. El campo eléctrico entre las placas hace que el rayo electrónico recorra la pantalla en sentido horizontal a velocidad constante y que luego, casi instantáneamente, vuelva atrás. Después todo este proceso se repite. Si ahora se conectan las placas de desviación verticales a un condensador, las oscilaciones de la tensión durante su descarga provocarán oscilaciones del rayo en sentido vertical. Como resultado se origina en la pantalla un "desarrollo" (barrido) de las oscilaciones con el tiempo (fig. 22) muy semejante al que trazaba el péndulo provisto del embudo con arena sobre la hoja de papel en movimiento. Las oscilaciones se amortiguan con el tiempo¹⁾.

Estas oscilaciones son *libres*. Se producen una vez que al condensador se le comunica la carga que saca al sistema de su posición de equilibrio. La carga del condensador es equivalente a la desviación del péndulo de su posición de equilibrio.

No resulta difícil obtener en un circuito oscilaciones forzadas. Estas oscilaciones se generan cuando en el sistema hay una fuerza electromotriz periódica. Una f.c.m. alterna se produce en un cuadro de alambre de varias espiras, haciéndolo girar en un campo magnético homogéneo (fig. 23). En este

¹⁾ Por lo general, las oscilaciones en el circuito se amortiguan en pequeñas fracciones de segundo. Por eso, para observarlas conviene utilizar un oscilógrafo con pantalla especial, capaz de emitir luz durante bastante tiempo después de haber sido excitada por el rayo electrónico.

caso el flujo magnético que pasa a través del cuadro varía periódicamente. De acuerdo con la ley de la inducción electromagnética, también varía periódicamente la f. e. m. inducida. El origen de la f. e. m. inducida, en este caso, es el siguiente: sobre los electrones que se mueven junto con los conductores del cuadro actúa una fuerza por parte del campo magnético. Esta fuerza hace que los electrones se desplacen a lo largo de dichos conductores. Cuando el circuito se cierra, a través del galvanómetro pasa corriente alterna y la aguja indicadora empieza a oscilar en torno a la posición de equilibrio.

2.2. Circuito oscilante

El sistema más simple en que se pueden producir oscilaciones eléctricas libres consiste en un condensador y una bobina, conectada a las armaduras del condensador (fig. 24). Este sistema recibe el nombre de *circuito oscilante*.

Veamos por qué se originan las oscilaciones en el circuito. Carguemos el condensador, conectándolo durante cierto tiempo a una batería a través del conmutador K (fig. 25, a). El condensador recibe la energía

$$W_p = \frac{q_m^2}{2C}, \quad (2.1)$$

donde q_m es la carga del condensador; C , su capacidad eléctrica. Entre las armaduras del condensador aparece la diferencia de potencial U_m .

Pasemos ahora el conmutador a la posición 2 (fig. 25, b). El condensador comienza a descargarse y por el circuito pasa corriente eléctrica. La intensidad de esta corriente no alcanza de inmediato su valor máximo, sino que va aumentando paulatinamente. Esto se debe al fenómeno de la autoinducción. Al aparecer la corriente se produce un campo magnético variable. Este campo magnético variable origina un campo eléctrico rotacional en el conductor. (De esto se habló en "Física 3".) El campo eléctrico rotacional, al aumentar el campo magnético, resulta dirigido en sentido contrario al de la corriente e impide que su crecimiento sea instantáneo.

A medida que se descarga el condensador la energía del campo eléctrico disminuye, pero al mismo tiempo aumenta la energía del campo magnético de

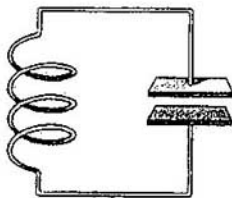


Fig. 24

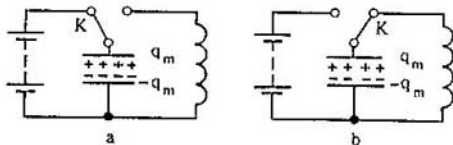


Fig. 25

la corriente, la cual se determina por la fórmula

$$W_m = \frac{Li^2}{2}, \quad (2.2)$$

en la que i es la intensidad de la corriente; L , la inductancia de la bobina. En el instante en que el condensador se descarga totalmente ($q = 0$), la energía del campo eléctrico se anula. En cambio, la energía de la corriente (energía del campo magnético), de acuerdo con la ley de conservación de la energía, será máxima. Por consiguiente, en dicho instante la intensidad de la corriente también alcanza su valor máximo I_m .

A pesar de que en este instante la diferencia de potencial entre los extremos de la bobina es nula, la corriente eléctrica no se interrumpe en el acto, porque a esto se opone el fenómeno de la autoinducción. En cuanto la intensidad de la corriente y el campo magnético creado por ella empiezan a disminuir, aparece un campo eléctrico rotacional dirigido en el sentido de la corriente, el cual mantiene a ésta.

Como resultado, el condensador se recarga hasta que la corriente, decreciendo paulatinamente, se anula. La energía del campo magnético en este instante también será nula, pero la energía del campo eléctrico del condensador será máxima otra vez.

Luego el condensador volverá a recargarse y el sistema retornará al estado inicial. Si no hubiera pérdidas de energía este proceso proseguiría indefinidamente. Las oscilaciones serían no amortiguadas. Al cabo de intervalos de tiempo iguales al período de las oscilaciones, el estado del sistema se repetiría exactamente.

Pero en realidad las pérdidas de energía son inevitables. Así, en particular, la bobina y los cables de conexión tienen una resistencia R , lo que hace que la energía del campo electromagnético se vaya convirtiendo poco a poco en energía interna del conductor.

2.3. Analogía entre las oscilaciones mecánicas y eléctricas

Las oscilaciones eléctricas en un circuito se asemejan a las oscilaciones mecánicas libres, por ejemplo, a las oscilaciones de una bolita sujeta a un muelle. Este parecido se refiere no a la naturaleza de las propias magnitudes que cambian con periodicidad, ya que en las oscilaciones mecánicas varían periódicamente la coordenada x del cuerpo y la proyección v_x de su velocidad, mientras que en las oscilaciones eléctricas varían la carga q del condensador y la intensidad i de la corriente en el circuito. Resultan similares los procesos de variación periódica de las magnitudes. La igualdad del carácter de las variaciones de las magnitudes (mecánicas y eléctricas) se explica porque existe analogía entre las condiciones que originan las oscilaciones mecánicas y eléctricas. El retorno a la posición de equilibrio de la bolita sujeta al muelle se debe a la fuerza de elasticidad F_x que es proporcional a la elongación de la bolita. El coeficiente de proporcionalidad es la rigidez k del muelle. La descarga del condensador (y la aparición de la corriente) está condicionada por la tensión

u entre las placas del condensador, la cual es proporcional a la carga q . El coeficiente de proporcionalidad, en este caso, es la magnitud $1/C$, recíproca de la capacidad, ya que $u = q/C$.

De un modo semejante a como, debido a la inercia, la velocidad de la bolita sólo aumenta paulatinamente bajo la acción de la fuerza y no se anula de inmediato después de cesar dicha acción, la corriente eléctrica en la bobina, a causa del fenómeno de la autoinducción, aumenta paulatinamente bajo la acción de la tensión y no desaparece de golpe cuando dicha tensión se anula. La inductancia L del circuito desempeña la misma función que la masa m del cuerpo en la mecánica. Esto se ve con más claridad cuando se comparan las expresiones de la energía cinética del cuerpo $mv_x^2/2$ y de la energía de la corriente $Li^2/2$.

A la carga del condensador por la batería corresponde, en el caso de las oscilaciones de la bolita sujeta al muelle, la comunicación a ésta de la energía potencial $kx_m^2/2$ cuando la bolita se desplaza (con la mano, por ejemplo) hasta la distancia x_m de su posición de equilibrio (fig. 26, a; la posición de equilibrio se indica mediante la raya izquierda vertical). Comparando esta expresión con la correspondiente a la energía del condensador $q_m^2/2C$, se advierte que la rigidez k del muelle desempeña en el proceso oscilatorio MECÁNICO el mismo papel que la magnitud recíproca de la capacidad $1/C$ en las oscilaciones ELÉCTRICAS, y la coordenada inicial x_m , el de la carga q_m .

Al surgimiento de la corriente i en el circuito eléctrico a expensas de la diferencia de potencial, corresponde la aparición en el sistema oscilante mecánico de la velocidad v_x bajo la acción de la fuerza de elasticidad del muelle (fig. 26, b); además la intensidad de la corriente alterna en un instante dado es, por definición, la derivada de la carga respecto del tiempo:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'$$

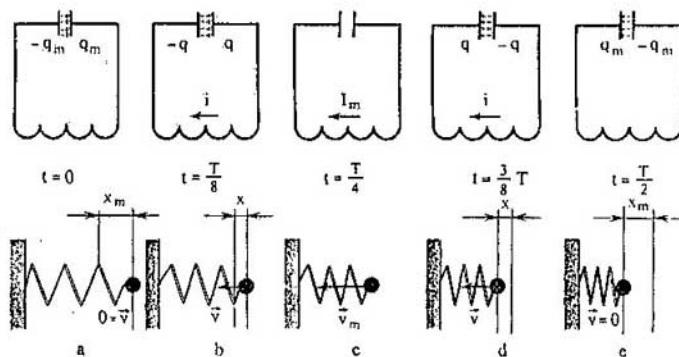


Fig. 26

Al instante en que el condensador se descarga y la intensidad de la corriente alcanza el máximo, corresponde el paso de la bolita por la posición de equilibrio con la velocidad máxima (fig. 26, *c*).

Después el condensador comienza a recargarse, y la bolita a desplazarse hacia la izquierda desde la posición de equilibrio (fig. 26, *d*). Al cabo de un tiempo igual a $7/2$ el condensador resulta totalmente cargado y la intensidad de la corriente se anula. A este estado corresponde la posición extrema izquierda de la bolita, en la cual su velocidad es nula (fig. 26, *e*). La correspondencia mutua entre las magnitudes mecánicas y eléctricas se ilustra con la tabla 1.

Tabla 1

Magnitudes mecánicas	Magnitudes eléctricas
Coordenada, x	Carga, q
Velocidad, v_x	Intensidad de la corriente, i
Aceleración, $a_x = v'_x$	Velocidad de variación de la intensidad de la corriente, i'
Masa, m	Inductancia, L
Rigidez del muelle, k	Magnitud recíproca de la capacidad, $1/C$
Energía potencial, $\frac{kx^2}{2}$	Energía del campo eléctrico, $\frac{q^2}{2C}$
Energía cinética, $\frac{mv_x^2}{2}$	Energía del campo magnético, $\frac{Li^2}{2}$

2.4. Periodo de las oscilaciones eléctricas libres. Ecuación de definición de los procesos en el circuito oscilante

Pasamos ahora a la teoría cuantitativa de los procesos que se desarrollan en el circuito oscilante.

FÓRMULA DE THOMSON. Nuestra tarea va a consistir, en primer lugar, en determinar el período (o la frecuencia) de las oscilaciones eléctricas libres. Es cierto que, basándose en la analogía entre las oscilaciones mecánicas y eléctricas libres, se puede escribir directamente la expresión para la frecuencia y el período de estas últimas oscilaciones. Efectivamente, como en la fórmula de la frecuencia angular de las oscilaciones libres de un cuerpo sujeto a un muelle, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, la magnitud k es análoga a la $1/C$, y m , a la inductancia L , la frecuencia de las oscilaciones eléctricas libres debe ser

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.3)$$

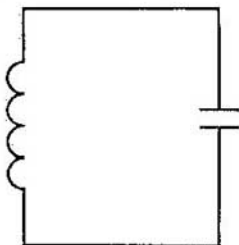


Fig. 27

Para el período de las oscilaciones libres en el circuito se puede escribir:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2.4)$$

La fórmula (2.4) se llama fórmula de Thomson, en honor del físico inglés W. Thomson, que fue el primero en deducirla.

Los resultados así obtenidos son correctos. No obstante, no pueden considerarse demostrados con suficiente rigurosidad. Hay que demostrar que la ecuación que define las oscilaciones eléctricas en el circuito no difiere, desde el punto de vista matemático, de la ecuación que define las oscilaciones mecánicas libres. Sólo después de esto podremos afirmar con absoluta seguridad que las oscilaciones mecánicas y eléctricas se rigen por las mismas leyes cuantitativas. Esto es lo más importante.

ECUACIÓN DE DEFINICIÓN DE LOS PROCESOS EN EL CIRCUITO OSCILANTE. Consideremos un circuito oscilante (fig. 27) cuya resistencia R pueda despreciarse. La ecuación que describe las oscilaciones eléctricas libres en este circuito se puede obtener por medio de la ley de conservación de la energía.

La energía electromagnética total W del circuito en cualquier instante es igual a la suma de las energías de los campos magnético y eléctrico:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}. \quad (2.5)$$

Esta energía no cambia con el tiempo, si la resistencia R del circuito es nula.

La derivada de la energía total respecto del tiempo es nula, ya que la energía es constante. Por consiguiente, es nula la suma de las derivadas respecto del tiempo de las energías de los campos magnético y eléctrico:

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' + \left(\frac{q^2}{2C}\right)' = 0,$$

o bien

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' = -\left(\frac{q^2}{2C}\right)'. \quad (2.6)$$

El sentido físico de la ecuación (2.6) consiste en que el módulo de la velocidad con que varía la energía del campo magnético es igual al módulo de la

velocidad con que varía la energía del campo eléctrico; el signo "menos" indica que cuando la energía del campo eléctrico aumenta, la energía del campo magnético disminuye (y viceversa). Precisamente por esto la energía total no varía.

Calculando las dos derivadas de la ecuación (2.6), se obtiene:

$$\frac{L}{2} \cdot 2i\dot{i}' = -\frac{1}{2C} \cdot 2qq' \quad (2.7)$$

Para la derivada de la carga respecto del tiempo es la intensidad de la corriente en un instante dado $q' = i$. Por lo tanto, la ecuación (2.7) se puede escribir en la forma siguiente:

$$Li\dot{i} = -\frac{qi}{C} \quad (2.8)$$

La derivada de la intensidad de la corriente respecto del tiempo no es más que la segunda derivada de la carga respecto de éste, de modo semejante a como la derivada de la velocidad (aceleración) es la segunda derivada de la coordenada respecto del mismo. Sustituyendo $\dot{i}' = q''$ en la ecuación (2.8) y dividiendo los dos miembros de ésta por Li , obtenemos la ecuación fundamental que define las oscilaciones eléctricas libres en el circuito:

$$q'' = -\frac{1}{LC}q \quad (2.9)$$

Ahora, por fin, ya puede usted apreciar plenamente la importancia de los esfuerzos hechos para estudiar las oscilaciones de la bolita sujeta al muelle y del péndulo. Observe que la ecuación (2.9), a excepción de las designaciones, no se diferencia en nada de la (1.11), que define las oscilaciones de la bolita sujeta al muelle. Sustituyendo en la ecuación (1.11) x por q , x'' por q'' , k por $1/C$ y m por L , se obtiene exactamente la ecuación (2.9). Pero la ecuación (1.11) ya la hemos resuelto. Por eso, sabiendo cómo oscila la bolita, podemos decir inmediatamente cómo ocurren las oscilaciones en el circuito.

En la ecuación (1.11) el coeficiente k/m es el cuadrado de la frecuencia propia de las oscilaciones. Del mismo modo, el coeficiente $1/(LC)$ en la ecuación (2.9) también es el cuadrado de la frecuencia angular de las oscilaciones eléctricas. Por consiguiente, las fórmulas (2.3) y (2.4) de la frecuencia y del período de las oscilaciones eléctricas pueden considerarse demostradas rigurosamente. Es natural que sin necesidad de ningunas ecuaciones hubiéramos podido intuir que el período T debe aumentar al crecer L y C . En efecto, al crecer L la corriente aumenta más lentamente con el tiempo y desciende más despacio hasta anularse.

Y cuanto mayor es la capacidad, tanto más tiempo es necesario para la recarga del condensador. Pero obtener la fórmula (2.4) sin la (2.9) y sin recurrir a la analogía entre las oscilaciones mecánicas y eléctricas, hubiera sido imposible.

OSCILACIONES ARMÓNICAS DE LA CARGA Y DE LA CORRIENTE. Lo mismo que la coordenada en las oscilaciones mecánicas (en caso de que en el instante inicial la elongación es la máxima) varía con el tiempo

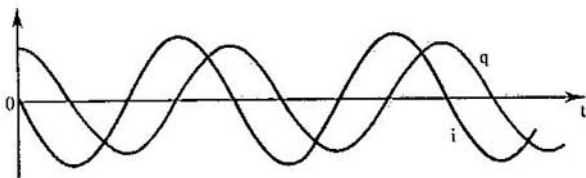


Fig. 28

según la ley armónica

$$x = x_m \cos \omega_0 t,$$

la carga del condensador varía con el tiempo de acuerdo con esta misma ley:

$$q = q_m \cos \omega_0 t, \quad (2.10)$$

en la que q_m es la amplitud de las oscilaciones de la carga.

La intensidad de la corriente también oscila armónicamente:

$$i = q' = -q_m \omega_0 \sin \omega_0 t = I_m \cos \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (2.11)$$

donde $I_m = q_m \omega_0$ es la amplitud de las oscilaciones de la intensidad de la corriente. Las oscilaciones de la intensidad de la corriente están desfasadas en $\pi/2$ respecto de las oscilaciones de la carga (fig. 28), de un modo semejante a como la fase de las oscilaciones de la velocidad, durante el movimiento de la bolita sujeta al muelle, adelanta en $\pi/2$ a la fase de las oscilaciones de la coordenada.

En realidad, a causa de las pérdidas de energía, las oscilaciones serán amortiguadas. Cuanto mayor sea la resistencia R , tanto mayor será el periodo de las oscilaciones. Si la resistencia es suficientemente grande, las oscilaciones no se producen en absoluto. El condensador se descarga, pero no tendrá lugar su recarga.

¿ ?

1. ¿En qué consiste la diferencia entre las oscilaciones eléctricas libres y las forzadas?
2. Explique la analogía entre las oscilaciones eléctricas en un circuito y las oscilaciones del péndulo simple.
3. ¿Cómo variará el periodo de las oscilaciones libres, si el condensador con capacidad C del circuito se sustituye por una batería de dos condensadores idénticos al primero? Considerar los casos en que los condensadores se acoplan en paralelo y en serie.
4. ¿Cómo están relacionadas entre sí las amplitudes de las oscilaciones de la carga y de la corriente, cuando un condensador se descarga a través de una bobina?

2.5. Corriente eléctrica alterna

Las oscilaciones eléctricas libres en un circuito se amortiguan con rapidez y por eso prácticamente no se utilizan. En cambio, las oscilaciones forzadas no amortiguadas (o mantenidas) tienen una enorme importancia práctica.



Fig. 29

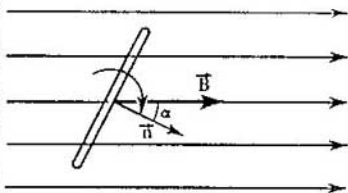


Fig. 30

La corriente alterna de la red del alumbrado doméstico y de las fábricas no es otra cosa sino oscilaciones eléctricas forzadas. La intensidad de la corriente varía con el tiempo según la ley armónica.

Esto se pone de manifiesto fácilmente valiéndose de un oscilógrafo. Si a las placas de desviación verticales del oscilógrafo se aplica la tensión de la red, el barrido del tiempo sobre la pantalla será una senoide (fig. 29). Conociendo la velocidad con que se mueve el rayo por la pantalla en sentido horizontal (determinada por la frecuencia de la tensión "en diente de sierra"), se puede hallar la frecuencia de las oscilaciones. Esta frecuencia es igual a 50 Hz. Esto significa que en el transcurso de un segundo la corriente pasa 50 veces en un sentido y 50 veces en el opuesto. La frecuencia de 50 Hz para la corriente industrial ha sido adoptada en muchos países del mundo. No obstante, en algunos países, por ejemplo en EE.UU., se emplea otra frecuencia industrial, la de 60 Hz.

Si la tensión en los extremos del circuito varía según la ley armónica, la intensidad del campo eléctrico dentro de los conductores variará también armónicamente. Estas variaciones armónicas de la intensidad del campo provocan oscilaciones armónicas de la velocidad del movimiento ordenado de las partículas cargadas y, por consiguiente, oscilaciones armónicas de la intensidad de la corriente.

Es cierto que, al variar la tensión en los extremos del circuito, el campo eléctrico varía no instantáneamente en todo el circuito. Las variaciones del campo se propagan a una velocidad muy grande, pero no infinita.

Sin embargo, cuando el tiempo de propagación del campo en el circuito es mucho menor que el periodo de las oscilaciones de la tensión, puede considerarse que el campo eléctrico varía inmediatamente en todo el circuito al

variar la tensión en los extremos de éste. Con esto la intensidad de la corriente en un instante dado tiene prácticamente el mismo valor en todas las secciones de un circuito no ramificado.

La tensión alterna en los enchufes de la red del alumbrado la crean los generadores en las centrales eléctricas. El cuadro de alambre, girando en el campo magnético continuo (véase 2.1), se puede considerar como un modelo muy simplificado de generador de corriente alterna. El flujo de inducción magnética Φ que atraviesa el cuadro de alambre, cuya superficie es S (véase el curso de "Física 3"), es proporcional al coseno del ángulo α entre la normal al cuadro y el vector inducción magnética (fig. 30):

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

Al girar el cuadro con la velocidad angular ω constante, el ángulo aumenta en proporción directa con el tiempo:

$$\alpha = \omega t.$$

Por eso el flujo de inducción magnética varía armónicamente:

$$\Phi = BS \cos \omega t.$$

De acuerdo con la ley de la inducción electromagnética, la f.e.m. inducida en el cuadro es igual a la velocidad con que varía la inducción magnética tomada con signo "menos", es decir, a la derivada del flujo de inducción magnética respecto del tiempo:

$$e = -\Phi' = -BS(\cos \omega t)' = BS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_m \sin \omega t,$$

donde $\mathcal{E}_m = BS\omega$ es la amplitud de la f.e.m. inducida.

En adelante, vamos a estudiar las oscilaciones elect. omagnéticas forzadas, que tienen lugar en los circuitos bajo la acción de una tensión que varía armónicamente con la frecuencia ω según la ley sinusoidal o cosinusoidal:

$$u = U_m \cos \omega t, \quad (2.12)$$

en la que U_m es la amplitud de la tensión¹⁾.

Si la tensión varía con la frecuencia ω , la intensidad de la corriente en el circuito variará con esa misma frecuencia. Pero la fase de las oscilaciones de la corriente no tiene que coincidir necesariamente con la fase de las oscilaciones de la tensión, lo mismo que la fase de las oscilaciones de la velocidad, en las oscilaciones mecánicas forzadas, hablando en general, no coincide con la fase de las oscilaciones de la fuerza. Por esta razón, en el caso general, la intensidad de la corriente i en un instante cualquiera (valor instantáneo de la intensidad de la corriente) se determina por la fórmula

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (2.13)$$

Aquí I_m es la amplitud de la intensidad de la corriente; φ , la diferencia de fase (defasaje) entre las oscilaciones de la corriente y las de la tensión.

¹⁾ La sustitución del seno por el coseno significa que la fase inicial de la tensión varía en $\pi/2$. Cuando se trata de oscilaciones forzadas esto carece de importancia.

2.6.

Resistencia óhmica en un circuito de corriente alterna.

Valor eficaz de la intensidad de la corriente y de la tensión

INTENSIDAD DE LA CORRIENTE EN UN CIRCUITO CON RESISTENCIA ÓHMICA.

Pasemos a conocer con más detalle lo que ocurre en un circuito conectado a una fuente de tensión alterna.

Supongamos que el circuito está formado por los cables de conexión y una carga de poca inductancia y gran resistencia R (fig. 31). A esta magnitud, que hasta ahora hemos venido llamando resistencia eléctrica o simplemente resistencia, la llamaremos *resistencia óhmica* o *resistencia activa*.

Esto se debe a que en el circuito de corriente alterna pueden haber resistencias de distinto carácter. La resistencia R se llama activa porque, cuando esta resistencia existe, el circuito absorbe energía suministrada por el generador. Más adelante veremos esto.

Vamos a considerar que la tensión en los extremos del circuito varía según la ley armónica

$$u = U_m \cos \omega t.$$

Lo mismo que en el caso de la corriente continua, el valor instantáneo de la intensidad de la corriente es proporcional al valor instantáneo de la tensión. Por eso, para hallar el valor instantáneo de la intensidad de la corriente puede aplicarse la ley de Ohm:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I \cos \omega t. \quad (2.14)$$

En un conductor con resistencia óhmica las oscilaciones de la intensidad de la corriente coinciden en fase con las oscilaciones de la tensión (fig. 32), y la amplitud de dicha intensidad se determina por la igualdad

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (2.15)$$

POTENCIA EN UN CIRCUITO CON RESISTENCIA ÓHMICA. En un circuito de corriente alterna de frecuencia industrial (50 Hz), la intensidad de la corriente y la tensión varían con relativa rapidez. Por eso cuando la corriente

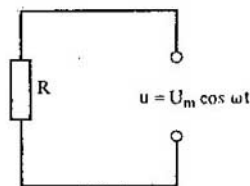


Fig. 31

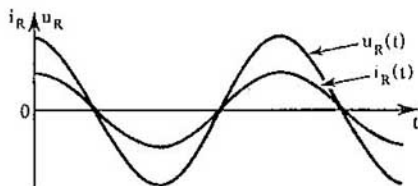


Fig. 32

pasa por un conductor, por ejemplo, por el filamento de una lámpara eléctrica, la cantidad de energía que se desprende también varía rápidamente con el tiempo. Pero de estas variaciones rápidas no nos damos cuenta.

Por regla general, en todos los casos hay que conocer la POTENCIA MEDIA de la corriente en un trozo de circuito durante un intervalo de tiempo que comprende muchos periodos. Para eso basta hallar la potencia media en un periodo (en los sucesivos periodos ingresa en la red esta misma energía). Se entiende por potencia medida de la corriente alterna en un periodo, la razón de la energía total, que entra en el circuito durante el periodo, a la duración de éste.

La potencia en un circuito de corriente continua en un trozo cuya resistencia sea R se determina por la fórmula

$$P = I^2 R. \quad (2.16)$$

En el transcurso de un intervalo de tiempo muy pequeño la corriente alterna se puede considerar invariable. Por eso la potencia instantánea en un circuito de corriente alterna en un trozo, cuya resistencia óhmica sea R , se halla por la fórmula

$$p = i^2 R. \quad (2.17)$$

Hallemos el valor medio de la potencia durante un periodo. Para esto, primeramente se transforma la fórmula (2.17), sustituyendo en ella la expresión de la intensidad de la corriente (2.14), $i = I_m \cos \omega t$, y utilizando la relación, conocida de las matemáticas, $\cos^2 \alpha = (1 + \cos 2\alpha)/2$:

$$p = \frac{I_m^2}{2} R (1 + \cos 2\omega t) = \frac{I_m^2 R}{2} + \frac{I_m^2 R}{2} \cos 2\omega t. \quad (2.18)$$

La gráfica de la potencia instantánea en función del tiempo se da en la fig. 33 con línea de color. En el transcurso de un cuarto de periodo, cuando $\cos 2\omega t > 0$, la potencia en todo instante es mayor que la magnitud $I_m^2 R/2$. En cambio, en el transcurso del siguiente cuarto de periodo, cuando $\cos 2\omega t < 0$, la potencia en cualquier instante es menor que la magnitud $I_m^2 R/2$. Como resultado, la energía desprendida durante medio periodo es igual al área del rectángulo $oabc$, y la potencia media, igual a $I_m^2 R/2$.

Este resultado se obtiene porque el valor medio de $\cos 2\omega t$ durante un periodo es nulo. En el transcurso de un cuarto de periodo toma esta función una serie de valores positivos, y en el transcurso del siguiente cuarto de periodo, toma la misma serie de valores negativos.

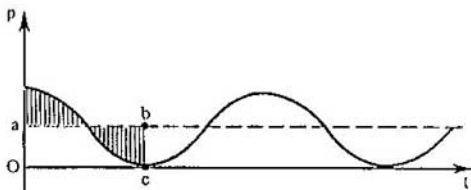


Fig. 33

Así, pues, la potencia media \bar{p} es igual al primer término de la fórmula (2.18):

$$\bar{p} = \bar{i}^2 R = \frac{I_m^2}{2} R. \quad (2.19)$$

VALOR EFICAZ DE LA INTENSIDAD DE LA CORRIENTE Y DE LA TENSIÓN. En la fórmula (2.19) se ve que la magnitud $I_m^2/2$ es el valor medio durante un período del cuadrado de la intensidad de la corriente:

$$\bar{i}^2 = \frac{I_m^2}{2}. \quad (2.20)$$

La magnitud igual a la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de la intensidad de la corriente se llama valor eficaz de la intensidad de la corriente alterna. El valor eficaz de la intensidad de la corriente alterna se designa por I :

$$I = \sqrt{\bar{i}^2} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.21)$$

Siempre se puede elegir un valor tal de la intensidad de la corriente continua que, la energía, desprendida durante cierto tiempo por esta corriente en el trozo cuya resistencia es R , sea igual a la energía desprendida, durante este mismo tiempo, por la corriente alterna. Para esto es necesario que la intensidad de la corriente continua sea igual al valor eficaz de la intensidad de la corriente alterna.

El valor eficaz de la tensión alterna se determina de modo análogo al valor eficaz de la intensidad de la corriente:

$$U = \sqrt{\bar{u}^2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.22)$$

Sustituyendo en la fórmula (2.15) los valores de la amplitud de la intensidad de la corriente y de la tensión por sus valores eficaces, se obtiene:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.23)$$

Esta es la ley de Ohm para un trozo de circuito de corriente alterna con resistencia óhmica.

Lo mismo que en las oscilaciones mecánicas, en el caso de las oscilaciones eléctricas no nos suelen interesar los valores de la corriente, de la tensión y de las otras magnitudes en cada instante. Son importantes las características generales de las oscilaciones, tales como la amplitud, el período, la frecuencia, los valores eficaces de la intensidad de la corriente y de la tensión y la potencia media. Precisamente los valores eficaces de la intensidad de la corriente y de la tensión son los que registran los amperímetros y los voltímetros de corriente alterna.

Es claro que también se hubiera podido caracterizar la corriente y la tensión alternas por sus amplitudes. Pero los valores eficaces son más convenientes en el sentido de que ellos determinan directamente el valor medio \bar{p} de la potencia de la corriente alterna o, como suele decirse, simplemente la potencia P de la

corriente alterna en el trozo de circuito:

$$P = I^2 R = UI.$$

¿ ?

1. ¿En qué condiciones se producen en un circuito eléctrico oscilaciones eléctricas forzadas?
2. ¿Cómo están relacionadas la intensidad de la corriente alterna y la tensión en un circuito con resistencia óhmica (activa)?
3. En las redes de alumbrado de corriente alterna se utilizan tensiones de 220 y 127 V. ¿Cuáles son las amplitudes de la tensión en estas redes?
4. ¿A qué se llama valores eficaces de la intensidad de la corriente y de la tensión?

2.7. Capacidad en un circuito de corriente alterna

La corriente continua no puede existir en un circuito que contenga un condensador, porque de hecho, en este caso, el circuito resulta abierto, ya que las armaduras del condensador están separadas por un dieléctrico.

La corriente alterna, en cambio, es capaz de pasar por un circuito en el que haya un condensador. De esto es fácil cerciorarse por medio de un simple experimento. Supongamos que se dispone de una fuente de tensión constante y de otra fuente de tensión alterna, siendo la tensión constante en los bornes de la fuente igual al valor eficaz de la tensión alterna. El circuito está formado por un condensador y una lámpara de incandescencia (fig. 34) unidos en serie. Cuando se conecta la tensión constante, la lámpara no se enciende. Pero si se conecta la tensión alterna, la lámpara se enciende si la capacidad del condensador es suficientemente grande.

¿Cómo puede pasar la corriente alterna por el circuito si éste está abierto en realidad (ya que entre las placas del condensador no pueden desplazarse las cargas)? En esencia, aquí se produce la carga y descarga periódicas del condensador bajo la acción de la tensión alterna. La corriente que pasa por el circuito, mientras se recarga el condensador, calienta el filamento de la lámpara.

Hallemos cómo varía con el tiempo la intensidad de la corriente en un circuito, constituido por un solo condensador, si la resistencia de los conductores y de las armaduras del condensador se puede despreciar (fig. 35).

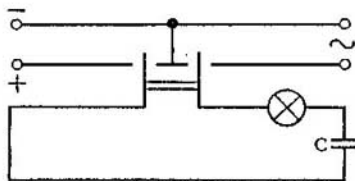


Fig. 34

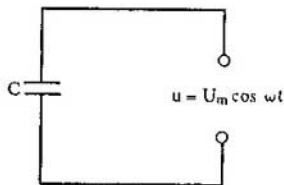


Fig. 35

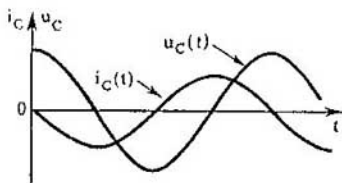


Fig. 36

La tensión en el condensador

$$u = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$$

será igual a la tensión en los extremos del circuito. Por consiguiente,

$$\frac{q}{C} = U_m \cos \omega t.$$

La carga del condensador varía de acuerdo con la ley armónica:

$$q = CU_m \cos \omega t. \quad (2.24)$$

La intensidad de la corriente, igual a la derivada de la carga respecto del tiempo, es

$$i = q' = -U_m C \omega \sin \omega t = U_m C \omega \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.25)$$

Por consiguiente, las oscilaciones de la intensidad de la corriente adelantan en $\pi/2$ a las oscilaciones de la tensión en el condensador (fig. 36). Esto significa que en el instante en que el condensador empieza a cargarse, la intensidad de la corriente es máxima y la tensión es nula. Una vez que la tensión llega al máximo, la intensidad de la corriente se anula y así sucesivamente.

La amplitud de la intensidad de la corriente es

$$I_m = U_m \omega C. \quad (2.26)$$

Si se introduce la designación

$$\frac{1}{\omega C} = X_C \quad (2.27)$$

y en vez de la amplitud de la intensidad de la corriente y de la tensión se aplican sus valores eficaces, se obtiene:

$$I = \frac{U}{X_C}. \quad (2.28)$$

La magnitud X_C , recíproca del producto de la frecuencia angular por la capacidad eléctrica del condensador, se llama *reactancia de capacidad* o *capacitancia*. El papel que desempeña esta magnitud es análogo al de la

resistencia óhmica R en la ley de Ohm (2.23). El valor eficaz de la intensidad de la corriente está relacionado con el valor eficaz de la tensión en el condensador exactamente lo mismo que, de acuerdo con la ley de Ohm, están relacionadas la intensidad de la corriente y la tensión en un trozo de circuito de corriente continua. Esto permite considerar la magnitud X_C como la resistencia del condensador a la corriente alterna (capacitancia).

Cuanto mayor sea la capacidad del condensador, tanto mayor será, según la fórmula (2.26), la corriente de recarga. Esto es fácil de apreciar por el incremento de la luminosidad de la lámpara si aumentamos la capacidad del condensador. Mientras que la resistencia del condensador a la corriente continua es infinita, su resistencia a la corriente alterna tiene un valor finito X_C . Al crecer la capacidad, la resistencia disminuye. También disminuye cuando aumenta la frecuencia.

Esto puede verse si para alimentar el circuito representado en la fig. 34 se utiliza un generador de corriente alterna de frecuencia regulable. Elevando de manera gradual la frecuencia de la corriente alterna se puede observar como aumenta la luminosidad de la lámpara. Esto se debe al crecimiento de la intensidad de la corriente a causa de la disminución de la capacitancia X_C del condensador. La luminosidad de la lámpara también aumenta cuando crece la capacidad del condensador.

Si a una de las entradas de un oscilógrafo de doble haz se aplica la tensión del condensador y a la otra entrada, la tensión cuyo valor instantáneo es proporcional a la intensidad de la corriente en el circuito (esta tensión se toma de la resistencia óhmica), en la pantalla se observan al mismo tiempo los oscilogramas de ambas oscilaciones, es decir, de la tensión y de la intensidad de la corriente. Estas observaciones confirman la deducción antes hecha de que las oscilaciones de la intensidad de la corriente en el circuito del condensador adelantan en fase a las oscilaciones de la tensión, como viene mostrado en la fig. 36.

En conclusión señalaremos que, en el transcurso del cuarto de período en que el condensador se carga hasta la tensión máxima, la energía entra en el circuito y se almacena en el condensador en forma de energía del campo eléctrico. En el cuarto de período siguiente, durante la descarga del condensador, esta energía retorna a la red.

2.8. Inductancia en un circuito de corriente alterna

La inductancia en el circuito influye en la intensidad de la corriente alterna. Esto se puede demostrar con un experimento sencillo. Montemos un circuito formado por una bobina de gran inductancia y una lámpara eléctrica de incandescencia (fig. 37). Por medio de un conmutador se puede conectar este circuito a una fuente de tensión constante o a una fuente de tensión alterna. La tensión constante y el valor eficaz de la tensión alterna deben ser iguales entre sí. La experiencia muestra que la lámpara brilla más en el caso de la tensión constante. Por consiguiente, el valor eficaz de la

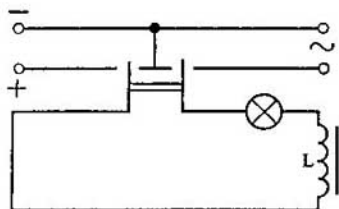


Fig. 37

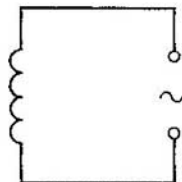


Fig. 38

intensidad de la corriente alterna en el circuito considerado es menor que la intensidad de la corriente continua.

Esto se explica por el fenómeno de la autoinducción. Por el curso de 'Física 3' ya se sabe que, cuando se conecta una bobina a una fuente de tensión constante, la intensidad de la corriente en el circuito crece paulatinamente. El campo eléctrico rotacional que se produce al aumentar la intensidad de la corriente frena el movimiento de los electrones. Sólo al cabo de cierto tiempo la intensidad de la corriente alcanza el valor máximo (de equilibrio), correspondiente a la tensión constante dada.

Si la tensión varía rápidamente, la intensidad de la corriente no tiene tiempo de alcanzar el valor de equilibrio que adquiriría con el tiempo para una tensión constante igual al valor máximo de la tensión alterna.

Por consiguiente, el valor máximo de la intensidad de la corriente alterna (su amplitud) está limitado por la inductancia L del circuito y será tanto menor cuanto mayor sea la inductancia y mayor la frecuencia de la tensión aplicada.

Vamos a determinar la intensidad de la corriente en un circuito en el cual hay una bobina, cuya resistencia óhmica se puede despreciar (fig. 38). Para esto se halla previamente la relación entre la tensión en la bobina y la f. c. m. autoinducida en ella.

Si la resistencia de la bobina es nula, la intensidad del campo eléctrico dentro del conductor en cualquier instante también debe ser nula. De lo contrario la intensidad de la corriente, de acuerdo con la ley de Ohm, sería infinita. La igualdad a cero de la intensidad del campo resulta ser posible porque la intensidad del campo rotacional eléctrico \vec{E}_i , generado por el campo magnético alterno, es en cada punto igual en módulo y tiene sentido contrario a la intensidad del campo coulombiano \vec{E}_c , creado en el conductor por las cargas, que se encuentran en los bornes de la fuente y en los conductores del circuito.

De la igualdad $\vec{E}_i = -\vec{E}_c$ se sigue que el trabajo del campo rotacional en transportar una carga positiva unitaria (o sea, la f. c. m. de autoinducción e_i) tiene el mismo módulo y signo contrario que el trabajo del campo coulombiano. Tomando en consideración que el trabajo del campo coulombiano es igual a la tensión en los extremos de la bobina, se puede escribir:

$$e_i = -u.$$

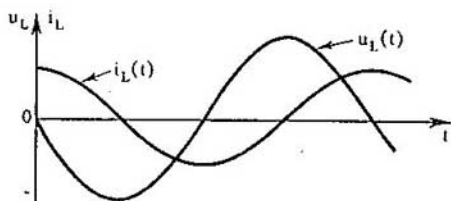


Fig. 39

Si la intensidad de la corriente varía según la ley armónica

$$i = I_m \operatorname{sen} \omega t,$$

la f.e.m. autoinducida será

$$e_i = -L i' = -L \omega I_m \cos \omega t. \quad (2.29)$$

Y como $u = -e_i$, la tensión en los extremos de la bobina se determina así:

$$u = L \omega I_m \cos \omega t = L \omega I_m \operatorname{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \operatorname{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (2.30)$$

donde $U_m = L \omega I_m$ es la amplitud de la tensión.

Por lo tanto, las oscilaciones de la tensión en la bobina adelantan a las oscilaciones de la intensidad de la corriente en $\pi/2$, o lo que es lo mismo, las oscilaciones de la intensidad de la corriente se retrasan, respecto de las de la tensión, en $\pi/2$.

En el instante en que la tensión en la bobina llega al máximo, la intensidad de la corriente es nula (fig. 39). Y en el instante en que la tensión se anula, la intensidad de la corriente tiene su módulo máximo.

La amplitud de la intensidad de la corriente en la bobina es

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}. \quad (2.31)$$

Si se introduce la designación

$$\omega L = X_L \quad (2.32)$$

y en vez de las amplitudes de la intensidad de la corriente y de la tensión se utilizan sus valores eficaces, se obtiene:

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (2.33)$$

La magnitud X_L , igual al producto de la frecuencia angular por la inductancia, se llama *reactancia inductiva*¹⁾.

¹⁾ También se conoce con el nombre de resistencia inductiva y, a veces, con el de inductancia del circuito (N. del T.).

De acuerdo con la fórmula (2.33), el valor eficaz de la intensidad de la corriente está ligado con el valor eficaz de la tensión y la reactancia inductiva por una relación semejante a la ley de Ohm para un circuito de corriente continua.

La reactancia inductiva depende de la frecuencia. La corriente continua no "nota" en absoluto la inductancia de la bobina. Cuando $\omega = 0$ la reactancia inductiva es nula ($X_L = 0$). Cuanto más de prisa varía la tensión, tanto mayor es la f.e.m. autoinducida y tanto menor la amplitud de la intensidad de la corriente.

Esto no es difícil de observar si para alimentar el circuito representado en la fig. 37 se toma un generador de corriente alterna con frecuencia regulable. Al mismo tiempo debe preverse también la posibilidad de variar la inductancia de la bobina (por ejemplo, conectando distinto número de espiras). Al aumentar la frecuencia o la inductancia, la intensidad de la corriente en el circuito disminuye y se debilita la luminosidad de la lámpara. Esto pone de manifiesto que la resistencia del circuito aumenta cuando crecen I' y ω .

El desplazamiento de fase (defasaje) entre la intensidad de la corriente y la tensión también puede observarse por el método del cual se habló en el párrafo anterior.

* * *

En el caso general, en que el circuito tenga resistencia óhmica, capacidad e inductancia, acopladas en serie, las oscilaciones de la intensidad de la corriente, como regla, estarán desfasadas respecto de las oscilaciones de la tensión (véase la fórmula 2.13). El defasaje depende de la frecuencia de la corriente alterna ω , de la inductancia L , de la capacidad C y de la resistencia óhmica R del circuito. La amplitud de la intensidad de la corriente será, como antes, proporcional a la amplitud de la tensión y vendrá determinada por los parámetros del circuito: ω , R , L y C .

¿ ?

1. ¿Aplicando qué fórmulas se calculan la capacidad y la reactancia inductiva?
2. ¿Cómo están relacionados los valores eficaces de la intensidad de la corriente y de la tensión en el condensador en un circuito de corriente alterna?
3. ¿Cómo están relacionados los valores eficaces de la intensidad de la corriente y de la tensión en una bobina de inductancia, cuya resistencia óhmica se puede omitir?

2.9. Resonancia en un circuito eléctrico

Al estudiar las oscilaciones mecánicas forzadas se dio a conocer un fenómeno importante, la *resonancia*. Este fenómeno se observa cuando la frecuencia propia de las oscilaciones del sistema coincide con la frecuencia de las variaciones de la fuerza exterior. Si el rozamiento es

pequeño, la amplitud de las oscilaciones forzadas estables aumenta bruscamente.

La coincidencia de las leyes de las oscilaciones mecánicas y electromagnéticas permite llegar inmediatamente a la conclusión de que la resonancia es posible en un circuito eléctrico, si éste es un circuito oscilante y posee una determinada frecuencia propia de oscilación.

En las oscilaciones mecánicas la resonancia se manifiesta claramente cuando los valores del coeficiente de rozamiento μ son pequeños. En el circuito eléctrico el papel del coeficiente de rozamiento lo desempeña la resistencia óhmica R . Precisamente esta resistencia del circuito es la que hace que la energía de la corriente se transforme en energía interna del conductor (el conductor se calienta). Por eso la resonancia en un circuito oscilante eléctrico deberá manifestarse claramente cuando la resistencia óhmica R sea pequeña.

Si la resistencia óhmica es pequeña, la frecuencia propia de las oscilaciones en el circuito se define por la fórmula

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

La intensidad de la corriente en las oscilaciones forzadas debe alcanzar sus valores máximos cuando la frecuencia de la tensión alterna, aplicada al circuito, sea igual a la frecuencia propia del sistema oscilante:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.34)$$

Se llama resonancia en un circuito oscilante eléctrico el fenómeno del brusco crecimiento de la amplitud de las oscilaciones forzadas, cuando coincide la frecuencia de la tensión alterna exterior con la frecuencia propia del circuito oscilante.

AMPLITUD DE LA INTENSIDAD DE LA CORRIENTE DE RESONANCIA. Lo mismo que en el caso de la resonancia mecánica, durante la resonancia en el circuito oscilante se crean las condiciones óptimas para la admisión de energía de la fuente exterior por el circuito. La potencia en el circuito es máxima en el caso en que la intensidad de la corriente coincide en fase con la tensión. Aquí existe una analogía total con las oscilaciones mecánicas: durante la resonancia, en el sistema oscilante mecánico la fuerza exterior (parámetro análogo a la tensión en el circuito) coincide en fase con la velocidad (parámetro análogo a la intensidad de la corriente).

El valor de resonancia de la intensidad de la corriente se establece no inmediatamente después de conectar la tensión exterior alterna al circuito. Las oscilaciones se van haciendo estables poco a poco. La amplitud de las oscilaciones de la intensidad de la corriente aumenta hasta que la energía que se desprende durante un periodo, a causa de la resistencia R , se equilibre con la energía que percibe el circuito en el mismo tiempo:

$$\frac{I_m^2 R}{2} = \frac{U_m I_m}{2}$$

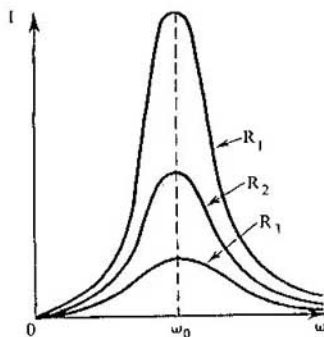


Fig. 40

De aquí la amplitud de las oscilaciones estables de la intensidad de la corriente durante la resonancia se determina por la ecuación

$$I_m R = U_m. \quad (2.35)$$

Esta ecuación es totalmente análoga a la $v_{ml} = F_m$ (véase el § 1.9), que define la amplitud de las oscilaciones de la velocidad en la resonancia mecánica.

De acuerdo con la ecuación (2.35), la amplitud de las oscilaciones de resonancia de la intensidad de la corriente es:

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (2.36)$$

Cuando $R \rightarrow 0$ el valor de resonancia de la intensidad de la corriente crece ilimitadamente: $I_{res} \rightarrow \infty$. Y al contrario, con el aumento de R el valor máximo de la intensidad de la corriente disminuye, y cuando los valores de R son gran-

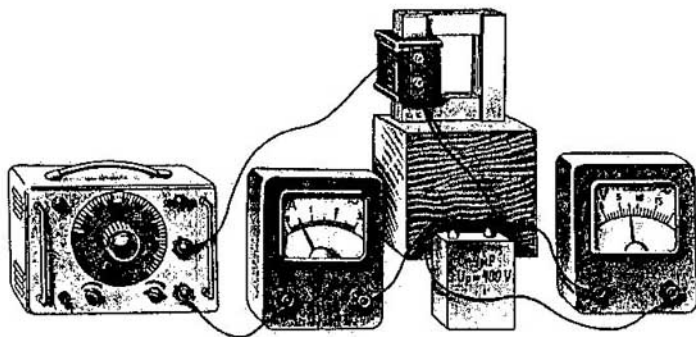


Fig. 41

des carece de sentido hablar de resonancia. Las gráficas de la amplitud de la intensidad de la corriente en función de la frecuencia, para distintas resistencias ($R_1 < R_2 < R_3$), se dan en la fig. 40.

AMPLITUD DE LA TENSIÓN DE RESONANCIA. Al mismo tiempo que crece la intensidad de la corriente, durante la resonancia aumenta bruscamente la tensión en el condensador y en la bobina de inductancia. Estas tensiones se igualan y superan en muchas veces la tensión exterior.

En efecto,

$$U_{C,m} = I_m \frac{1}{\omega_0 C} = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad U_{L,m} = I_m \omega_0 L = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

La tensión exterior está relacionada con la corriente de resonancia así:

$$U_m = I_m R.$$

Si

$$R \ll \sqrt{\frac{L}{C}},$$

resulta que

$$U_{C,m} = U_{L,m} \gg U_m.$$

Para observar la resonancia en un circuito eléctrico se monta la instalación que se muestra la fig. 41. En ella se utiliza una fuente exterior de tensión alterna de frecuencia regulable. Aumentando poco a poco la frecuencia de las oscilaciones de la tensión exterior se puede observar cómo varía la intensidad de la corriente en el circuito, midiéndola con el amperímetro, y la tensión en el condensador o en la bobina de inductancia, midiéndola con el voltímetro. Estas magnitudes aumentan durante la resonancia decenas e incluso centenares de veces.

APLICACIÓN DE LA RESONANCIA EN LA RADIOCOMUNICACIÓN. El fenómeno de la resonancia se aprovecha, en particular, para efectuar la radiocomunicación. Las ondas radioeléctricas (hertzianas) procedentes de distintas emisoras excitan en la antena del aparato receptor corrientes alternas de diferentes frecuencias (fig. 42), ya que cada emisora funciona con su frecuencia. Con la antena está acoplado por inducción un circuito oscilante. En virtud de la inducción electromagnética, en la bobina del circuito oscilante se generan las fuerzas electromotrices alternas de las

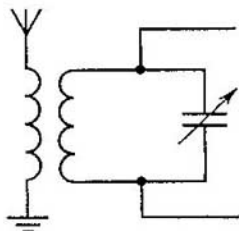


Fig. 42

respectivas frecuencias y las oscilaciones forzadas de la corriente de estas mismas frecuencias. Pero solamente cuando se produce la resonancia las oscilaciones de la corriente y de la tensión en el circuito serán importantes. Teniendo esto en cuenta, se dice que de las oscilaciones de todas las frecuencias excitadas en la antena, el circuito oscilante separa únicamente las oscilaciones cuya frecuencia es igual a la frecuencia propia del circuito. El ajuste del circuito oscilante a la frecuencia ω_0 necesaria se efectúa generalmente variando la capacidad del condensador. En esto consiste la sintonización del receptor a una emisora determinada.

NECESIDAD DE TENER EN CUENTA LA POSIBILIDAD DE LA RESONANCIA EN EL CIRCUITO ELÉCTRICO. En ciertos casos la resonancia en el circuito eléctrico puede acarrear un gran perjuicio. Si el circuito no ha sido calculado para que funcione en las condiciones de la resonancia, la aparición de ésta ocasiona averías. Las intensidades de corriente excesivamente grandes pueden recalentar los conductores. Las grandes tensiones ocasionan la perforación (ruptura) del aislamiento. Este tipo de averías era frecuente en el siglo pasado, cuando aún se comprendían mal las leyes de las oscilaciones eléctricas y no se sabían calcular correctamente los circuitos eléctricos.

2.10. Lámpara electrónica de tres electrodos

Antes de pasar al estudio de otro tipo de oscilaciones eléctricas, llamadas *autooscilaciones* u *oscilaciones autoexcitadas*, debemos conocer la estructura de la lámpara (válvula) electrónica de tres electrodos, denominada *triodo*.

En el curso de "Física 3" (Ed. MIR) se explicó la estructura y la acción del diodo o válvula electrónica de dos electrodos. Los dos electrodos de esta última, el cátodo y el ánodo, se encuentran en una ampolla de la cual se extrae el aire. El cátodo, calentado por la corriente, emite electrones y alrededor de él se forma una nube de carga espacial negativa. Bajo la acción del campo eléctrico de la válvula, dirigido del ánodo al cátodo, los electrones de esta nube se lanzan hacia el ánodo y originan una corriente eléctrica.

El triodo tiene además un electrodo adicional, la rejilla. Ésta se sitúa entre el cátodo y el ánodo, pero mucho más cerca del cátodo. Su mismo nombre, "rejilla", indica que este electrodo no es continuo y puede dejar pasar los electrones lanzados desde el cátodo hacia el ánodo. La rejilla, en la mayoría de las válvulas electrónicas, es una armazón de alambre en forma de línea helicoidal (fig. 43) sujeta a unos soportes. La representación convencional del triodo se muestra en la fig. 44.

Si entre la rejilla y el cátodo se crea una diferencia de potencial (tensión de rejilla), entre estos electrodos se produce un campo eléctrico. Este campo influye fuertemente en la cantidad de electrones que llegan al ánodo, es decir, en la intensidad de la corriente que pasa por la válvula (intensidad de la corriente anódica). La particularidad principal del triodo consiste en la posibilidad de regular la corriente anódica variando la diferencia de potencial entre la rejilla y el cátodo.

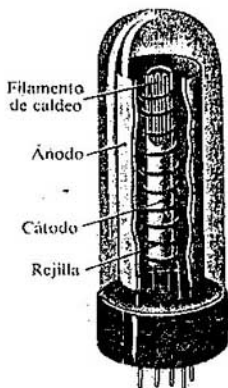


Fig. 43

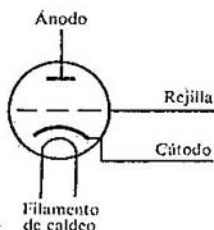


Fig. 44

En la fig. 45 se muestra la gráfica de la intensidad de la corriente anódica I_a en función de la tensión de rejilla U_r , para una tensión anódica (diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo) U_a invariable. Esta gráfica recibe el nombre de característica de rejilla de la válvula. Esta característica se puede obtener experimentalmente. Para esto se utiliza el dispositivo cuyo esquema se da en la fig. 46.

Por la característica de rejilla se ve que el aumento del potencial de rejilla (respecto del cátodo) hace que crezca la corriente anódica. Cuando disminuye el potencial de rejilla, la intensidad de la corriente anódica, por el contrario, decrece. La corriente anódica se interrumpe (la válvula se cierra) si el potencial en la rejilla disminuye hasta cierto valor U_b . Este potencial, llamado *potencial de bloqueo* de la válvula, depende de la estructura de ésta y de la tensión anódica.

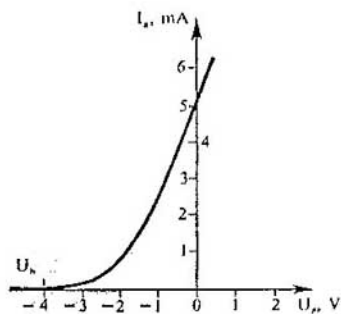


Fig. 45

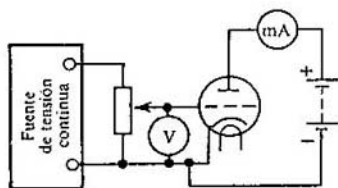


Fig. 46

La característica de rejilla que se da en la fig. 45 se explica como sigue. El campo eléctrico de la rejilla cargada positivamente actúa sobre los electrones de la nube de carga espacial con una fuerza dirigida hacia el ánodo. Como resultado, la nube electrónica se disipa. Por eso la mayor parte de los electrones, que emite el cátodo, pasan por entre las espiras de la rejilla. La corriente anódica será mayor. Cuando el potencial de rejilla es negativo, el campo eléctrico entre la rejilla y el cátodo tiene sentido contrario. Con esto la carga espacial negativa que hay alrededor del cátodo aumenta y sólo la menor parte de los electrones, emitidos por el cátodo, pasa por entre las espiras de la rejilla hacia el ánodo. En este caso la corriente anódica será menor.

Debido a que la rejilla está situada a poca distancia del cátodo, una variación de ΔU_r en la tensión de rejilla hace que la intensidad del campo eléctrico, que actúa sobre la nube electrónica junto al cátodo, cambie mucho más que al variar la tensión anódica en la misma magnitud¹⁾. Según esto, iguales variaciones ΔI_n de la corriente anódica se consiguen con variaciones mucho menores (decenas de veces menores) de la tensión de rejilla que de la tensión anódica. En esto consiste la propiedad más importante del triodo, que da la posibilidad de utilizarlo en diversos dispositivos radiotécnicos: amplificadores, osciladores de lámpara, etc.

2.11. Oscilador de lámpara

Las oscilaciones eléctricas forzadas que hemos estudiado hasta ahora se originan bajo la acción de la tensión alterna, que producen los generadores en las centrales eléctricas.

Pero estos generadores son incapaces de crear las oscilaciones de alta frecuencia que se utilizan en radiotecnica, ya que para eso se necesitaría que los rotores girasen con una velocidad excesivamente grande.

Las oscilaciones de alta frecuencia se obtienen por medio de otros dispositivos, uno de los cuales es el *oscilador de lámpara* (o *de válvula*), llamado así porque una de sus partes esenciales es una lámpara (válvula) de tres electrodos, es decir, un triodo.

El oscilador de lámpara es un sistema autooscilante, en el cual se excitan oscilaciones no amortiguadas a expensas de la energía de una fuente de tensión continua, por ejemplo, de una batería de pilas o de un rectificador. En este sentido el oscilador de lámpara se asemeja a un reloj, en el cual las oscilaciones no amortiguadas del péndulo se mantienen a cuenta de la energía de las pesas subidas o del muelle tenso.

El oscilador de lámpara consta de un circuito oscilante, formado por una bobina de inductancia L y un condensador de capacidad C . Sabemos que si el condensador se carga, en el circuito se producen oscilaciones amortiguadas.

¹⁾ Recuérdese que la intensidad del campo eléctrico se determina por la fórmula $E = U/d$ (en la que U es la tensión entre dos puntos sobre una línea de intensidad; d , la distancia entre estos puntos).

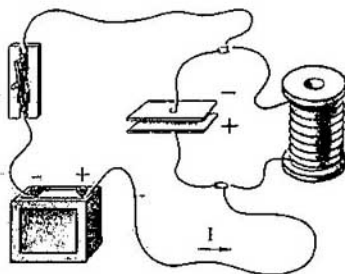


Fig. 47

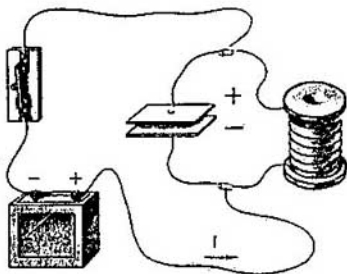


Fig. 48

Para que las oscilaciones no se amortigüen hay que compensar las pérdidas de energía en cada período.

La energía en el circuito se puede reponer volviendo a cargar el condensador. Para eso se conecta periódicamente el circuito, durante cierto intervalo de tiempo, a una fuente de tensión continua. Si en el transcurso del intervalo de tiempo, en que el interruptor está cerrado, los signos de las cargas en las armaduras del condensador están de acuerdo con la fig. 47, al recargar el condensador el campo eléctrico de las cargas que hay en sus armaduras realiza trabajo negativo y la energía del condensador aumenta¹⁾.

En cambio, si durante el período de tiempo, en que el interruptor está cerrado, los signos de las cargas que hay en las armaduras del condensador están de acuerdo con la fig. 48, el campo eléctrico de dichas cargas realizará trabajo positivo. La energía del condensador disminuirá en este caso y aquél se descargará parcialmente.

Por lo tanto, una fuente de tensión continua conectada todo el tiempo al circuito no puede mantener en él las oscilaciones no amortiguadas. Durante medio período la energía entrará en el circuito, y en el medio período siguiente saldrá de él.

Pero si por medio de un interruptor se conecta la fuente de corriente al circuito oscilante solamente en aquellos semiperíodos en que tiene lugar suministro de energía al circuito (véase la fig. 47), se establecen las oscilaciones no amortiguadas. Está claro que para esto es necesario conseguir que el interruptor (o la válvula, como suele decirse) funcione automáticamente. Como se trata de oscilaciones de frecuencia muy alta, el interruptor debe poseer una enorme rapidez de acción. En calidad de interruptor prácticamente sin inercia se utiliza un triodo (fig. 49).

Por el circuito anódico, al que está acoplado el circuito oscilante, debe pasar corriente en aquellos intervalos de tiempo en que la armadura del condensador, conectada al polo positivo de la fuente, esté cargada positivamente. Para eso las oscilaciones en el circuito deben controlar el potencial de la rejilla u_r , que

¹⁾ Por la mecánica sabemos que si las fuerzas internas del sistema realizan trabajo negativo, la energía potencial del sistema aumenta.

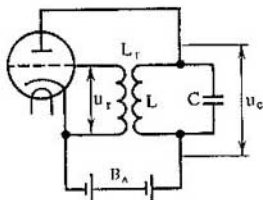


Fig. 49

regula la intensidad de la corriente en el circuito anódico. Se necesita una reacción¹⁾.

La reacción en el oscilador de lámpara, cuyo esquema se da en la fig. 49, se llama inductiva. En el circuito de rejilla se intercala la bobina L_r , acoplada por inducción a la bobina del circuito oscilante. Las oscilaciones de corriente en este último, debido al fenómeno de la inducción electromagnética, hacen que se produzcan oscilaciones de la tensión en los extremos de la bobina L_r y, por lo tanto, oscilaciones del potencial en la rejilla del triodo.

Si la fase de las oscilaciones de la corriente anódica se ha elegido correctamente, los "impulsos" de esta corriente actúan sobre el circuito oscilante en los instantes precisos y las oscilaciones no se amortiguan en el circuito.

Una vez que se cierra el circuito anódico, el condensador se carga y en el circuito oscilante empiezan las oscilaciones. Su amplitud aumenta hasta que las pérdidas de energía en el circuito oscilante son compensadas exactamente con la energía que procede del circuito anódico de la válvula.

La frecuencia de las oscilaciones en el circuito oscilante viene determinada por la inductancia L de la bobina y la capacidad C del condensador, de acuerdo con la fórmula de Thomson:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Cuando L y C son pequeñas, la frecuencia de las oscilaciones es grande.

La aparición de las oscilaciones en el oscilador (excitación del oscilador) se puede evidenciar valiéndose de un oscilógrafo, haciendo llegar a sus placas desviadoras verticales la tensión del condensador.

Tienen osciladores de lámpara todas las emisoras de radio y muchos dispositivos radiotécnicos.

Tomando como ejemplo el oscilador de lámpara se pueden destacar claramente los elementos esenciales característicos de los sistemas oscilantes (fig. 50):

- 1) una fuente de energía, a costa de la cual se mantienen las oscilaciones no amortiguadas (en el oscilador de lámpara es una fuente de tensión constante);
- 2) un dispositivo que regula el suministro de energía de la fuente, es decir, la

¹⁾ En el reloj de péndulo la reacción se efectúa por medio del mecanismo de áncora.



Fig. 50

“válvula” (en el oscilador de lámpara el papel de “válvula” lo desempeña el triodo);

3) un sistema oscilante, o sea, la parte del sistema autooscilante en que directamente se producen las oscilaciones (en el oscilador de lámpara éste es el circuito oscilante);

4) una reacción, por medio de la cual el sistema oscilante controla la “válvula” (en el oscilador de lámpara este papel lo desempeña el acoplamiento inductivo de la bobina del circuito oscilante con la bobina del circuito de rejilla).

* * *

Con esto concluimos el estudio de las oscilaciones mecánicas y eléctricas. Es notable la identidad del carácter general de procesos de distinta naturaleza y la identidad de las ecuaciones matemáticas que los definen. Esta identidad, como se ha visto, facilita mucho el estudio de las oscilaciones.

¿ ?

1. ¿Puede la amplitud de la intensidad de la corriente de resonancia, en un circuito con resistencia óhmica R , superar la intensidad de la corriente continua en un circuito con la misma resistencia óhmica y tensión constante, igual a la amplitud de la tensión alterna?
2. ¿A qué es igual la diferencia de fase entre las oscilaciones de la intensidad de la corriente y de la tensión durante la resonancia?
3. ¿Cumpliendo qué condición las propiedades de la resonancia se ponen de manifiesto claramente?
4. ¿Qué función desempeña la rejilla en el triodo?
5. ¿Cómo se efectúa la reacción en el oscilador de lámpara?
6. Mencione (basándose en el ejemplo del oscilador de lámpara) los elementos fundamentales que componen un sistema autooscilante.

Ejemplos de resolución de problemas

PROBLEMA 1. La carga máxima en las armaduras del condensador de un circuito oscilante es $q_m = 10^{-6}$ C. El valor de la amplitud de la intensidad de la corriente en el circuito es $I_m = 10^{-3}$ A. Determinar el periodo T de las oscilaciones. Las pérdidas por calentamiento de los conductores se pueden despreciar.

Solución. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, el valor máximo de la energía del campo eléctrico del condensador es igual al valor

máximo de la energía del campo magnético de la bobina:

$$\frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}$$

De donde

$$CL = \frac{q_m^2}{I_m^2} \quad \text{o} \quad \sqrt{LC} = \frac{q_m}{I_m}$$

Por lo tanto,

$$T = 2\pi\sqrt{LC} = 2\pi \frac{q_m}{I_m}$$
$$T \approx 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ s.}$$

PROBLEMA 2. Un cuadro cuya área $S = 3000 \text{ cm}^2$ tiene $N = 200$ espiras y gira en un campo magnético homogéneo cuya inducción $B = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ T}$. La f.e.m. máxima en el cuadro $\mathcal{E}_m = 1,5 \text{ V}$. Determinar el tiempo T que tarda en dar una vuelta.

Solución. La amplitud de la f.e.m. inducida en una espira se determina por la fórmula

$$e_m = BS\omega.$$

Como las fuerzas electromotrices que se producen en cada espira del cuadro por separado se suman, para la amplitud de la f.e.m. del cuadro se tiene:

$$\mathcal{E}_m = NBS\omega.$$

De donde

$$\omega = \frac{\mathcal{E}_m}{NBS}.$$

El tiempo que tarda el cuadro en dar una vuelta se puede hallar así:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi NBS}{\mathcal{E}_m}$$
$$T \approx 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ s.}$$

PROBLEMA 3. Una bobina de reactancia inductiva $X_L = 500 \Omega$ está conectada a una fuente de tensión alterna, cuya frecuencia $\nu = 1000 \text{ Hz}$. El valor eficaz de la tensión $U = 100 \text{ V}$. Determinar la amplitud de la intensidad de la corriente I_m en el circuito y la inductancia L de la bobina. La resistencia óhmica de la bobina se desprecia.

Solución. La reactancia inductiva de la bobina se expresa por la fórmula

$$X_L = \omega L = 2\pi\nu L$$

De donde

$$L = \frac{X_L}{2\pi\nu} = 0,08 \text{ H.}$$

Como la amplitud de la tensión se relaciona con su valor eficaz por la fórmula $U_m = U\sqrt{2}$, para la amplitud de la intensidad de la corriente se obtiene:

$$I_m = \frac{U_m}{X_L} = \frac{U\sqrt{2}}{X_L} = 0,28 \text{ A.}$$

PROBLEMA 4. En un circuito de corriente alterna de frecuencia $\nu = 500 \text{ Hz}$ está intercalada una bobina cuya inductancia $L = 10 \text{ mH}$. ¿Qué capacidad debe tener el condensador intercalado en este circuito para que se produzca la resonancia?

Solución. El circuito eléctrico a que se refieren las condiciones del problema es un circuito oscilante. En este circuito se originará la resonancia cuando la frecuencia de la corriente alterna sea igual a la frecuencia propia del circuito oscilante ($\nu = \nu_0$). Pero

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

por lo que

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

De donde

$$C = \frac{1}{2\pi^2 L \nu^2},$$

$$C \approx 10 \mu\text{F}.$$

Ejercicio

2

- Una vez que al condensador de un circuito oscilante se le comunica la carga $q = 10^{-5} \text{ C}$, en el circuito se producen oscilaciones amortiguadas. ¿Qué cantidad de calor se desprenderá en el circuito durante el tiempo que transcurra hasta que las oscilaciones se amortigüen totalmente en él? La capacidad del condensador $C = 0,01 \mu\text{F}$.
- Un circuito oscilante está formado por una bobina de inductancia $L = 0,003 \text{ H}$ y un condensador plano constituido por dos placas, en forma de discos de radio $r = 1,2 \text{ cm}$, situadas a la distancia $d = 0,3 \text{ mm}$ una de otra. Determinar el período de las oscilaciones libres en el circuito. ¿Cómo variaría su período si el espacio entre las armaduras del condensador se llenara con un dieléctrico de permitividad $\epsilon = 4$?
- ¿Dentro de qué límites debe variar la inductancia de la bobina de un circuito oscilante para que la frecuencia de las oscilaciones varíe de 400 a 500 Hz? La capacidad del condensador es de $10 \mu\text{F}$.
- Hallar la amplitud de la f. e. m. inducida en un cuadro, que gira en un campo magnético homogéneo, si la frecuencia de rotación es 50 r. p. s.; el área del cuadro, 100 cm^2 , y la inducción magnética, $0,2 \text{ T}$.

5. En un cuadro de alambre cuya área $S = 100 \text{ cm}^2$ se excita una f. e. m. inducida de amplitud $\mathcal{E}_m = 1,4 \text{ V}$. El número de espiras del cuadro $N = 200$. El cuadro gira a velocidad angular constante en un campo magnético homogéneo cuya inducción $B = 0,15 \text{ T}$. En el instante inicial el plano del cuadro es perpendicular al vector \vec{B} . Determinar la f. e. m. inducida e en el cuadro al cabo de $t = 0,1 \text{ s}$ de haber empezado su movimiento.
6. Una bobina de inductancia $L = 0,08 \text{ H}$ está conectada a una fuente de tensión alterna de frecuencia $\nu = 1000 \text{ Hz}$. El valor eficaz de la tensión $U = 100 \text{ V}$. Determinar la amplitud I_m de la corriente del circuito.
7. En un circuito oscilante se produce la resonancia cuando la frecuencia de las oscilaciones $\nu = 400 \text{ Hz}$. Si en paralelo al condensador de capacidad $C_1 = 10^{-6} \text{ F}$, se acopla otro condensador de capacidad C_2 , la frecuencia de resonancia viene a ser $\nu_2 = 100 \text{ Hz}$. Determinar la capacidad C_2 .

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 2

Durante las oscilaciones eléctricas tienen lugar variaciones periódicas de la carga eléctrica, de la intensidad de la corriente y de la tensión. Lo mismo que las oscilaciones mecánicas, las eléctricas se subdividen en libres, forzadas y autooscilaciones.

El sistema más simple en que se observan oscilaciones eléctricas libres es el circuito resonante. Éste consta de una bobina de alambre y un condensador. El condensador cargado desempeña un papel análogo al del muelle comprimido en las oscilaciones mecánicas, y la inductancia de la bobina, el papel de la masa del cuerpo oscilante. Las ecuaciones que describen las oscilaciones eléctricas tienen la misma forma que las ecuaciones de las oscilaciones mecánicas. El período de las oscilaciones armónicas libres en un circuito con pequeña resistencia óhmica R se determina por la fórmula de Thomson:

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

en la que L es la inductancia de la bobina; C , la capacidad eléctrica del condensador.

Las oscilaciones forzadas, es decir, la corriente eléctrica alterna, se producen en el circuito bajo la acción de una tensión periódica exterior. Entre las oscilaciones de la tensión y de la intensidad de la corriente, en el caso general, existe un desfase φ . En la resistencia óhmica R este desfase es nulo. En el condensador las oscilaciones de la intensidad de la corriente adelantan a las de la tensión en $\pi/2$, y en la bobina, las oscilaciones de la intensidad de la corriente se retrasan con respecto a las de la tensión en $\pi/2$. La resistencia del condensador a la corriente alterna (reactancia capacitiva o capacitancia) se determina por la fórmula

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

y la resistencia de la bobina de inductancia (reactancia inductiva) a la corriente

alterna, por la fórmula

$$X_L = L\omega.$$

Cuando coincide la frecuencia de la tensión alterna exterior con la frecuencia propia del circuito oscilante se origina la resonancia, es decir, un aumento brusco de la amplitud de las oscilaciones forzadas de la intensidad de la corriente. La resonancia sólo se manifiesta claramente cuando la resistencia óhmica del circuito oscilante es pequeña. El desfase entre las oscilaciones de la intensidad de la corriente y las oscilaciones de la tensión durante la resonancia es nulo. La amplitud de las oscilaciones estables de la intensidad de la corriente de resonancia se determina por la relación

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

Al mismo tiempo que aumenta la intensidad de la corriente tiene lugar un incremento brusco de la tensión en el condensador y en la bobina. El fenómeno de la resonancia eléctrica se aprovecha en la radiocomunicación. El circuito oscilante del receptor de radio separa, de entre todas las oscilaciones que se excitan en la antena, aquellas oscilaciones cuya frecuencia es igual a la frecuencia propia del circuito.

Las autooscilaciones se excitan en el circuito oscilante del oscilador de lámpara a expensas de la energía de una fuente de corriente continua. En el oscilador de lámpara se utiliza una válvula de tres electrodos (triodo), es decir, un tubo electrónico en el cual, además del cátodo y el ánodo, hay un electrodo de control o gobierno, la rejilla. Las oscilaciones en el circuito generan oscilaciones de la tensión de rejilla, las cuales, a su vez, regulan la intensidad de la corriente en el circuito anódico (reacción). El circuito anódico suministra al circuito oscilante la energía que compensa las pérdidas por resistencia óhmica de este último.

3.1. Generación de energía eléctrica

La energía eléctrica posee ventajas indiscutibles frente a todas las demás formas de energía. Se puede transmitir a enormes distancias por cables, con pérdidas relativamente pequeñas, y distribuir convenientemente entre los consumidores. Pero lo más importante es que esta forma de la energía, valiéndose de dispositivos simples, se puede transformar en otras cualesquiera: mecánica, interna (calentamiento de cuerpos), luminosa, etc.

La *corriente alterna* tiene la ventaja, frente a la continua, de que su tensión e intensidad se pueden transformar dentro de límites muy amplios casi sin pérdidas de energía. Estas transformaciones son necesarias en muchos aparatos electro y radiotécnicos. La transformación de la tensión y la intensidad de la corriente es muy necesaria, en especial, cuando se tiene que transportar la energía eléctrica a grandes distancias.

La energía eléctrica se produce en los *generadores*, aparatos que transforman una forma determinada de la energía en eléctrica. A los generadores pertenecen las pilas voltaicas, las máquinas electrostáticas, las pilas o baterías termoelectrónicas¹⁾, las baterías solares que se utilizan en las naves cósmicas, etc. Se está investigando la posibilidad de crear generadores de tipos esencialmente nuevos. Por ejemplo, se estudian las llamadas pilas de combustible, en las cuales la energía que se libera como resultado de la reacción del hidrógeno con el oxígeno se transforma directamente en eléctrica. Se trabaja con éxito en la creación de generadores magnetohidrodinámicos (generadores MHD). En ellos se realiza la transformación directa de la energía mecánica de un chorro de gas ionizado incandescente (plasma), que se mueve en un campo magnético, en energía eléctrica.

El campo de aplicación de cada uno de los tipos de generadores de energía eléctrica enumerados se determina por sus características. Así, las máquinas electrostáticas crean una gran diferencia de potencial, pero son incapaces de producir en el circuito una intensidad de corriente algo importante. Las pilas voltaicas pueden proporcionar una intensidad de corriente grande, pero su acción es poco duradera.

En la actualidad el papel preponderante lo desempeñan los *generadores electromecánicos de inducción* para corriente alterna. En estos generadores la energía mecánica se transforma en eléctrica. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. La estructura de estos generadores

¹⁾ En las baterías térmicas se aprovecha la propiedad que tienen dos contactos de materiales distintos, de crear f.e.m. a expensas de la diferencia de temperatura entre ellos.

es relativamente simple y permite obtener grandes intensidades de corriente con tensiones suficientemente elevadas.

En adelante, al hablar de generadores, vamos a referirnos precisamente a los electromecánicos de inducción.

GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA. El principio básico del funcionamiento del generador de corriente alterna (también llamado alternador) fue ya estudiado en el § 2.5.

En la actualidad existen muchos tipos de generadores de inducción. Pero todos ellos tienen los mismos elementos fundamentales. Son éstos, PRIMERO, un electroimán o imán permanente que crea el campo magnético, y, SEGUNDO, un devanado en el cual se induce la f.e.m. alterna (en el modelo del generador estudiado era el cuadro giratorio). Como las fuerzas electromotrices que se inducen en las espiras acopladas en serie se suman, la amplitud de la f.e.m. en el cuadro es proporcional al número de espiras que hay en él. La f.e.m. inducida es también proporcional a la amplitud del flujo magnético variable $\Phi_m = BS$ que pasa a través de cada espira (véase el § 2.5).

Para obtener un flujo magnético grande, en los generadores se utiliza un sistema magnético casi cerrado, consistente en dos núcleos de acero electrotécnico especial. Los devanados que crean el campo magnético se encuentran en las ranuras de uno de los núcleos, y los devanados en los cuales se induce la f.e.m., en las ranuras del otro. Uno de los núcleos (de ordinario el interior), junto con su devanado, gira alrededor de un eje horizontal o vertical. Por eso se llama *rotor*. El núcleo en reposo, junto con su devanado, recibe el nombre de *estator*. El espacio entre los núcleos del estator y del rotor (entrehierro) se hace lo menor posible. Esto asegura el valor máximo del flujo de inducción magnética.

Como los núcleos de acero son conductores, durante el funcionamiento del generador se inducen en ellos corrientes de Foucault parásitas. Estas corrientes calientan inútilmente los núcleos. Las pérdidas de energía correspondientes hacen que disminuya el rendimiento del generador. Para debilitar las corrientes de Foucault y reducir las pérdidas de energía, los núcleos de los generadores se hacen de láminas de acero delgadas aisladas entre sí.

En el modelo de generador representado en la fig. 23 gira un cuadro de alambre, que es el rotor (aunque sin núcleo de hierro). El campo magnético lo crea un imán permanente en reposo. Está claro que también hubiera podido procederse al contrario, es decir, haciendo girar el imán y manteniendo en reposo el cuadro.

En los grandes generadores industriales gira precisamente el electroimán, que hace las veces de rotor, mientras que los devanados en que se induce la f.e.m. se encuentran en las ranuras del estator y permanecen en reposo. Para suministrar la corriente al rotor o conducirla de su devanado al circuito exterior hay que valerse de contactos corredizos. Para eso el rotor se provee de *anillos colectores* unidos a los extremos del devanado (fig. 51). Unas plaquitas fijas - *escobillas* -, que frotan con los anillos colectores, ponen en comunicación el devanado del rotor con el circuito exterior. La intensidad de la corriente en los devanados del electroimán, que crea el campo magnético, es mucho menor que la intensidad de la corriente que cede el generador al circuito exterior. Por eso la corriente generada conviene tomarla de los devanados en reposo y, por

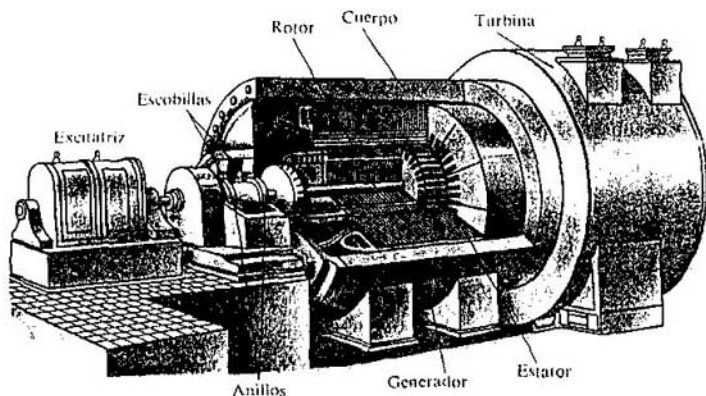


Fig. 51

medio de los contactos corredizos, suministrar la corriente relativamente débil al electroimán giratorio. Esta última corriente es producida por un generador independiente de corriente continua (excitatriz) acoplado al eje en directo¹⁾.

En los generadores de pequeña potencia el campo magnético lo crea un imán permanente giratorio. En este caso no hacen falta los colectores ni las escobillas. La aparición de la f. e. m. en los devanados en reposo del estator se explica porque en ellos se produce un campo eléctrico rotacional, originado por la variación del flujo magnético debida a la rotación del rotor.

Si en un campo magnético homogéneo gira un cuadro plano, el período de la f. e. m. generada es igual al período de rotación del cuadro. Esto no es siempre conveniente. Por ejemplo, para obtener corriente alterna con 50 Hz de frecuencia, el cuadro debe realizar en el campo magnético homogéneo 50 r. p. s., es decir, 3000 r. p. m. Este número de revoluciones será necesario también en el caso de la rotación de un imán bipolar permanente o de un electroimán bipolar. En efecto, el período de variación del flujo magnético que atraviesa las espiras del devanado del rotor debe ser igual a $1/50$ s. Para esto cada uno de los polos del rotor debe pasar junto a las espiras 50 veces por segundo. La velocidad de rotación se puede disminuir si como rotor se utiliza un electroimán que tenga 4, 6, 8, ... polos. Entonces el período de la corriente que se genera corresponderá al tiempo necesario para que el rotor gire, respectivamente, $1/2$, $1/3$, $1/4$, ... de circunferencia. Por consiguiente, el rotor puede girar 2, 3, 4, veces más despacio. Esto tiene importancia cuando el generador es accionado por motores lentos, por ejemplo, por turbinas hidráulicas. Así, los rotores de los generadores de la central hidroeléctrica de Úglich, en el Volga, realizan 62,5 r. p. m. y tienen 48 pares de polos.

¹⁾ En la actualidad la corriente continua para el devanado del rotor se toma en muchos casos del devanado del estator del mismo generador, a través de un rectificador.

3.2. Transformador

La f.e.m. de los potentes generadores de las centrales eléctricas suele ser bastante grande. Sin embargo, en la práctica se necesita de ordinario una tensión no demasiado alta.

La transformación de la corriente alterna, consistente en aumentar o disminuir la tensión varias veces sin pérdidas prácticas, se consigue con los transformadores.

El primero en utilizar los transformadores fue el científico ruso P. N. YÁBLOCHKOV, quien en 1878 los empleó para alimentar las "bujías eléctricas" inventadas por él, que en aquel tiempo eran una nueva fuente de luz. La idea de Yáblochkov fue desarrollada por el colaborador científico de la Universidad de Moscú I. F. USAGUIN, que construyó transformadores perfeccionados.

Un transformador consta de un núcleo de acero cerrado sobre el cual van montadas dos (y a veces más) bobinas con devanados o arrollamientos de alambre (fig. 52). Uno de los arrollamientos, llamado *primario*, se conecta con la fuente de tensión alterna. El otro arrollamiento, al cual se acopla la "carga", es decir, los aparatos y dispositivos consumidores de energía eléctrica, recibe el nombre de *secundario*. El esquema de la estructura del transformador con dos arrollamientos se da en la fig. 53; su representación convencional, en la fig. 54.

El funcionamiento del transformador se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. Cuando por el arrollamiento primario pasa corriente alterna, en el núcleo aparece un flujo magnético alterno que excita f.e.m. inducida en cada arrollamiento. El núcleo, de acero para transformadores, concentra el campo magnético de tal modo, que el flujo magnético sólo existe prácticamente dentro de dicho núcleo y es igual en todas sus secciones.

El valor instantáneo de la f.e.m. inducida e en cualquier espira del arrollamiento primario o del secundario es el mismo. De acuerdo con la ley de Faraday, este valor se determina por la fórmula

$$e = - \Phi', \quad (3.1)$$

en la que Φ' es la derivada del flujo de inducción magnética respecto del tiempo.

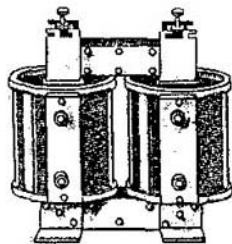


Fig. 52

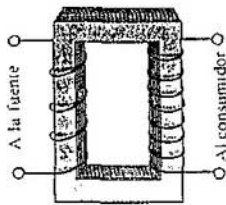


Fig. 53

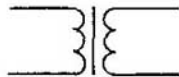


Fig. 54

Si $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$, entonces

$$\Phi' = -\omega \Phi_m \operatorname{sen} \omega t. \quad (3.2)$$

Por consiguiente,

$$e = \omega \Phi_m \operatorname{sen} \omega t,$$

o bien

$$e = \mathcal{E}_m \operatorname{sen} \omega t,$$

siendo $\mathcal{E}_m = \omega \Phi_m$ la amplitud de la f.c.m. en una espira.

En el arrollamiento primario, que tiene n_1 espiras, la f.c.m. inducida total e_1 es igual a $n_1 e$. En el secundario la f.c.m. total e_2 es igual a $n_2 e$ (donde n_2 es el número de espiras de este arrollamiento). De aquí se sigue que

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (3.4)$$

De ordinario la resistencia óhmica de los arrollamientos del transformador es pequeña y se puede despreciar. Por eso, como ya se explicó en el § 2.8,

$$u_1 \approx -e_1. \quad (3.5)$$

Cuando el arrollamiento secundario del transformador está abierto, la corriente no pasa por él y se cumple la relación

$$u_2 = -e_2. \quad (3.6)$$

Los valores instantáneos de las fuerzas electromotrices e_1 y e_2 varían en coincidencia de fases (alcanzan el máximo al mismo tiempo y pasan por cero a la vez). Por lo tanto, su relación en la fórmula (3.4) se puede sustituir por la relación de los valores eficaces \mathcal{E}_1 y \mathcal{E}_2 de estas fuerzas electromotrices o, teniendo en cuenta las igualdades (3.5) y (3.6), por la relación de los valores eficaces de las tensiones U_1 y U_2 :

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2} = K. \quad (3.7)$$

La magnitud K se denomina *relación de transformación* o *coeficiente de ampliación*. Si $K > 1$, el transformador es reductor de tensión, y si $K < 1$, es elevador de tensión.

Cuando el arrollamiento secundario está abierto, el desfase entre la intensidad de la corriente en el primario y la tensión que se suministra a este arrollamiento se aproxima a $\pi/2$ (véase el § 2.8). Por esta razón un transformador con resistencia óhmica pequeña en el primario casi no consume en este caso energía de la red.

Si a los extremos del arrollamiento secundario se conecta un circuito consumidor de energía eléctrica, o, como suele decirse, si se carga el transformador, la intensidad de la corriente en dicho arrollamiento ya no será nula. La corriente que se produce crece en el núcleo su propio flujo magnético alterno, el

cual, según la ley de Lenz, debe hacer que disminuya la variación del flujo magnético en el núcleo.

Pero la disminución de la amplitud de las oscilaciones del flujo magnético resultante debe, a su vez, hacer que disminuya la f.e.m. inducida en el arrollamiento primario. Sin embargo, esto es imposible, ya que según (3.5) $|u_1| = |e_1|$. Por eso, cuando se cierra el circuito del secundario, aumenta automáticamente la intensidad de la corriente en el primario. Su amplitud crece de tal modo, que tiende a restablecer el valor anterior de la amplitud de las oscilaciones del flujo magnético resultante. Al mismo tiempo disminuye el desfase entre la tensión y la intensidad de la corriente en el arrollamiento primario.

El aumento de la intensidad de la corriente en el circuito del arrollamiento primario se produce de acuerdo con la ley de conservación de la energía: la entrega de energía eléctrica al circuito conectado al arrollamiento secundario del transformador va acompañada del consumo de la misma cantidad de energía de la red por el arrollamiento primario. La potencia en el circuito primario debe ser igual, aproximadamente, a la potencia en el circuito secundario:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2. \quad (3.8)$$

De donde

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \quad (3.9)$$

Esto significa que si se eleva varias veces la tensión con el transformador, el mismo número de veces disminuye la intensidad de la corriente (y viceversa).

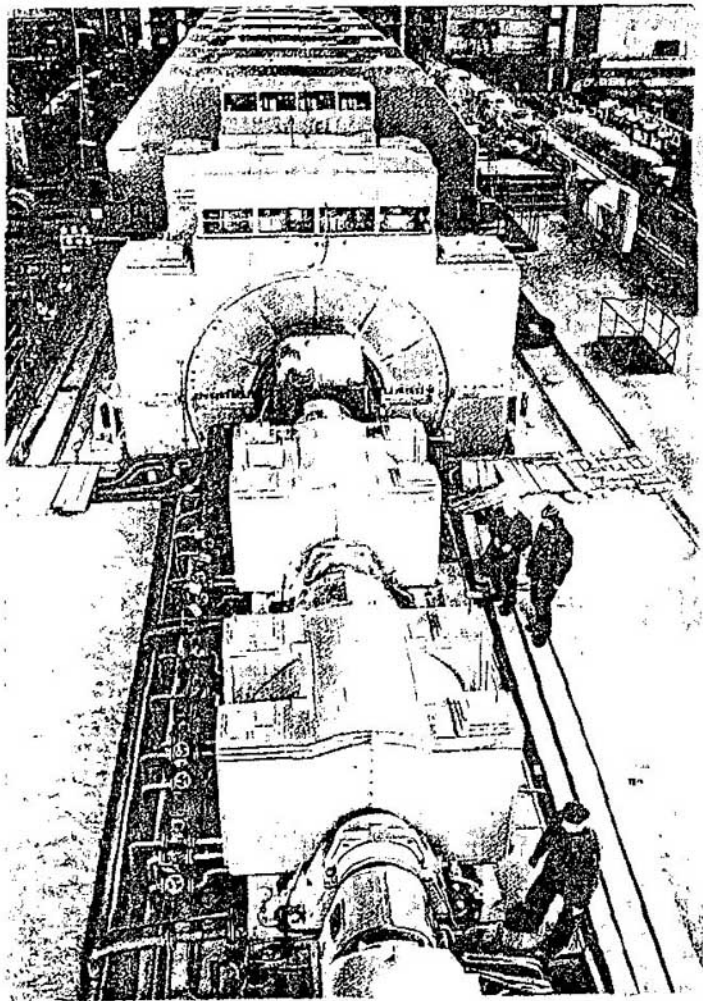
En los transformadores potentes modernos las pérdidas totales de energía no superan un 2-3%.

3.3. Producción y utilización de la energía eléctrica

En nuestra época el nivel de producción y consumo de energía¹⁾ es uno de los índices más importantes del desarrollo de las fuerzas productivas de la sociedad. El papel rector lo desempeña la energía eléctrica, que es la forma más universal y fácil de utilizar de la energía. Si el consumo de energía en el mundo se duplica, aproximadamente, en 25 años, el consumo de energía eléctrica se duplica, por término medio, cada 10 años. Esto significa que cada vez es mayor el número de procesos vinculados con el consumo de energía en los cuales se pasa a utilizar energía eléctrica.

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. Tanto en las grandes centrales como en las pequeñas, la energía eléctrica se produce fundamentalmente por medio de generadores electromecánicos de inducción. Hay

¹⁾ Naturalmente que con esto la energía no desaparece. La tarea de la energética consiste únicamente en obtener energía en la forma más fácil de utilizar. Durante el proceso de consumo, la energía, en fin de cuentas, se transforma principalmente en energía interna.



Grupo energético de 1 millón 200 mil kW de la central eléctrica regional de Kostromá.

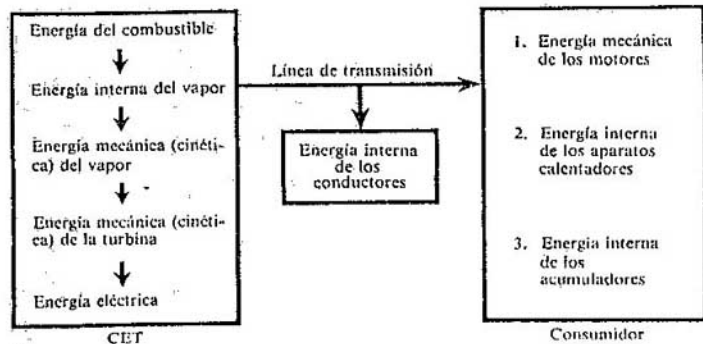


Fig. 55

dos tipos principales de centrales eléctricas: *térmicas e hidráulicas*. Estas centrales se diferencian por el tipo de los motores que accionan los rotores de los generadores.

En las CENTRALES ELÉCTRICAS TÉRMICAS sirve de fuente de energía un combustible: carbón, gas, petróleo, mazut o esquistos combustibles. Los rotores de los generadores eléctricos giran impulsados por turbinas de vapor o de gas, o por motores de combustión interna. Las más económicas son las grandes centrales eléctricas térmicas de turbinas de vapor (abreviado CET). La mayoría de las CET de la URSS utilizan como combustible polvo de carbón. En la producción de 1 kW·h de energía eléctrica se gastan unos centenares de gramos de carbón. En la caldera de vapor más del 90% del calor que desprende el combustible se transmite al vapor. En la turbina la energía cinética del chorro de vapor se transfiere al rotor. El árbol de la turbina está unido rigidamente al del generador. Los turbogeneradores de vapor son muy rápidos: el número de revoluciones del rotor es de varios millares por minuto.

Del curso de "Física 3" (Ed. MIR) se sabe que el rendimiento de los motores térmicos crece al aumentar la temperatura inicial del agente de transformación. Por eso se hace que el vapor que entra en la turbina tenga parámetros elevados: temperatura de hasta 550 °C y presión de hasta 25 MPa. El rendimiento de las CET llega al 40%. Una gran parte de la energía se pierde junto con el vapor de escape. Las transformaciones de la energía se muestran en el esquema representado en la fig. 55.

Las centrales eléctricas térmicas especiales llamadas *centrales termoeléctricas (CTE)* permiten aprovechar una parte importante de la energía del vapor de escape en las empresas industriales y en aplicaciones domésticas (calentamiento de agua para la calefacción, abastecimiento de agua caliente, etc.). Como resultado el rendimiento de la CTE alcanza un 60-70%. En la actualidad las CTE proporcionan cerca del 40% de toda la energía eléctrica de la URSS y suministran energía eléctrica y calor a más de 800 ciudades.

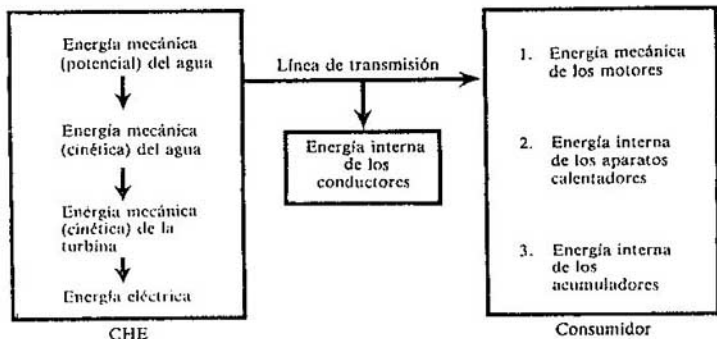


Fig. 56

En la rama de la termocentralización¹⁾ la Unión Soviética ocupa un puesto rector en la energética mundial.

En las CENTRALES ELÉCTRICAS HIDRÁULICAS o HIDROELÉCTRICAS (CHE) para hacer girar los rotores de los generadores se utiliza la energía potencial del agua. Los rotores de los generadores eléctricos son accionados por turbinas hidráulicas. La potencia de la central depende de la diferencia de nivel del agua (altura hidrostática) que crea la presa y de la masa de agua que pasa por la turbina cada segundo (caudal de agua). Las transformaciones de la energía se muestran en el esquema representado en la fig. 56.

Las centrales hidroeléctricas proporcionan cerca del 20% del total de la energía eléctrica que se produce en la URSS.

Cada vez es más importante el papel que empiezan a desempeñar las *centrales eléctricas atómicas o nucleares* (CEA). La primera CEA fue construida en la URSS en 1954.

UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA. El principal consumidor de energía eléctrica en la URSS es la industria, a la cual corresponde cerca del 70% de la energía que se produce. Otro gran consumidor es el transporte. Cada vez es mayor la cantidad de líneas de ferrocarril que pasan a la tracción eléctrica. Casi todos los koljoses²⁾ y sovjoses³⁾ reciben energía eléctrica de las centrales eléctricas del Estado para cubrir sus necesidades de producción y domésticas. El empleo de la energía eléctrica en el alumbrado público y privado y en los aparatos electrodomésticos es de todos conocido.

Una gran parte de la energía eléctrica que hoy se utiliza se transforma en energía mecánica. Casi todos los mecanismos industriales están accionados por

¹⁾ Este término, como traducción del ruso "теплофикация" es proposición mía, por no estar de acuerdo con el de "calefacción central" o "centralizada" que suele emplearse, pero que no refleja la idea exacta (N. del T).

²⁾ Hacienda rural soviética colectivizada.

³⁾ Hacienda rural soviética nacionalizada.

motores eléctricos. Éstos son fáciles de manejar, compactos y dan la posibilidad de automatizar la producción.

Cerca de la tercera parte de la energía eléctrica que consume la industria se utiliza con fines tecnológicos (soldadura eléctrica, calentamiento y fusión de metales, electrólisis, etc.).

3.4. Transmisión de la energía eléctrica

Consumidores de energía eléctrica existen en todas partes. Pero esta energía se produce en relativamente pocos sitios, próximos a los yacimientos de combustible y a los recursos hidráulicos. La energía eléctrica no se logra conservar en gran escala. Tiene que ser consumida inmediatamente después de obtenerse. Por eso se plantea la necesidad de transportarla a grandes distancias. Este transporte o transmisión origina pérdidas considerables. Se debe esto a que la corriente eléctrica calienta los conductores de las líneas de transmisión de energía. De acuerdo con la ley de Joule - Lenz, la energía que se gasta en calentar los conductores de la línea se determina por la fórmula

$$Q = I^2 R t,$$

en la que R es la resistencia de la línea. Si la longitud de la línea es muy grande, el transporte de la energía puede no ser conveniente desde el punto de vista económico. La resistencia de la línea es prácticamente muy difícil de disminuir. Por eso hay que reducir la intensidad de la corriente.

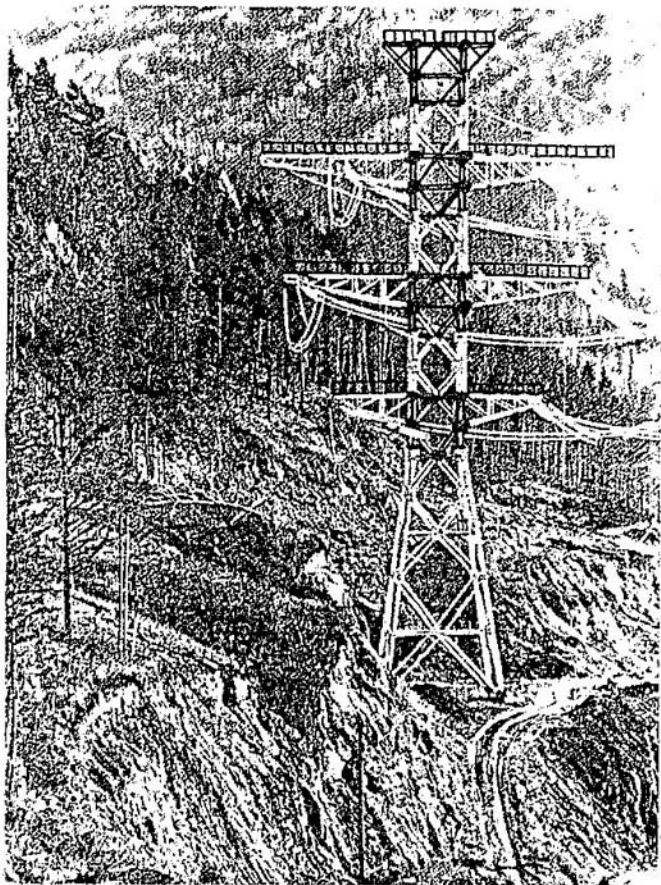
Como la potencia de la corriente es proporcional al producto de la intensidad de la corriente por la tensión, para conservar la potencia transmitida hay que elevar la tensión en la línea de transporte. Cuanto más larga sea dicha línea, tanto más conveniente será emplear una tensión más alta. Así, en la línea de alta tensión que conduce la energía desde la CIE de Volgogrado (en el Volga) hasta Moscú, se utiliza la tensión de 500 kV. Pero los generadores de corriente alterna se construyen para tensiones que no superan 16-20 kV. Tensiones mayores requerirían la adopción de complicadas medidas especiales para aislar los devanados y otras partes de los generadores.

Por esta razón en las grandes centrales eléctricas se instalan transformadores elevadores. El transformador eleva la tensión en la línea tantas veces como disminuye la intensidad de la corriente.

Para la utilización directa de la energía eléctrica en los motores que accionan las máquinas herramientas, en la red del alumbrado y con otros fines, la tensión en los extremos de la línea tiene que reducirse. Esto se consigue con los transformadores reductores.

De ordinario la disminución de la tensión y el aumento respectivo de la intensidad de la corriente se efectúa en varias etapas. En cada etapa se va haciendo menor la tensión y se va ampliando el territorio abarcado por la red eléctrica. El esquema de la transmisión y distribución de la energía eléctrica se da en la fig. 57.

Cuando la tensión entre los conductores es muy elevada comienza a producirse la descarga por efecto corona, que origina pérdidas de energía. La



Torre de la línea de transmisión de energía de la central hidroeléctrica Sayánskaya
(sobre el río Yeniseí)

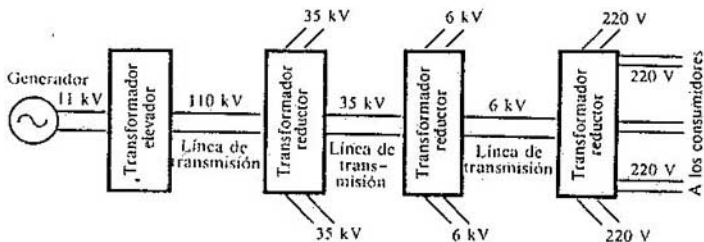


Fig. 57

amplitud permisible de la tensión alterna debe ser tal, que, para el área de la sección transversal del conductor dada, las pérdidas de energía debidas al efecto corona sean insignificantes.

Las centrales eléctricas de una serie de zonas de la Unión Soviética están unidas por líneas de transmisión de alta tensión, las llamadas líneas de transporte de energía, formando una red eléctrica común, a la cual se conectan los consumidores. Esta red común recibe el nombre de *sistema energético* y da la posibilidad de suavizar las cargas "de cresta" del consumo de energía durante las primeras horas de la mañana y de la tarde. El sistema energético asegura el suministro continuo de energía a los consumidores, independientemente del lugar de su emplazamiento. En la actualidad casi todo el territorio de la URSS está abastecido de energía por sistemas energéticos unificados. Ya funciona el sistema energético unificado de la parte europea de la Unión Soviética.

3.5. Logros y perspectivas de la electrificación de la URSS

En 1920 fue aprobado el primer plan de desarrollo de la economía nacional basado en la electrificación, el plan GOELRO (Comisión Estatal para la Electrificación de Rusia). El promotor e inspirador de dicho plan fue V. I. Lenin, que concedía a la electrificación una importancia decisiva en la reconstrucción económica del país.

Según decía Lenin: "Sólo cuando el país esté electrificado, cuando la industria, la agricultura y el transporte se asienten sobre la base técnica de una gran industria moderna, sólo entonces venceremos definitivamente"¹⁾.

El plan GOELRO, que preveía duplicar la producción industrial y cuadruplicar la producción de energía eléctrica en comparación con el año 1913, fue superado en todos sus índices en el plazo de 10 años que se había establecido. Incrementando el ritmo de la electrificación de año en año, la Unión Soviética ocupó en 1947 el primer puesto de Europa y el segundo del mundo de producción de energía eléctrica.

¹⁾ V. I. Lenin. *Obras escogidas en 12 tomos*. Tomo XI, pág. 311, Ed. Progreso, Moscú, 1977.

Ahora, en un solo día, la URSS produce, aproximadamente, 6 veces más energía que produjo en todo el año 1921, primer año de cumplimiento del plan GOELRO.

En la Unión Soviética se han construido centrales eléctricas hidráulicas, térmicas y atómicas de enorme potencia. La central hidroeléctrica más grande del país es la de Krasnoyarsk. En ella se han instalado los grupos hidráulicos más potentes del mundo (de 500 mil kW cada uno); la potencia total de esta central es de 6 millones de kW.

En la URSS se encuentra en explotación un gran número de centrales eléctricas térmicas de más de 1 millón de kW cada una. Muchas de ellas tienen más de 3 millones de kW de potencia, y la de Refinski (en la provincia de Sverdlovsk), 3,8 millones de kW y, en la actualidad, es la central eléctrica térmica más grande de la Unión Soviética.

Se ha previsto un desarrollo anticipado de la energética atómica en la parte europea de la URSS.

Unificando los sistemas energéticos de Siberia y Asia Central con el de la parte europea de país, se forma el sistema energético unificado de toda la URSS. Esto eleva la fiabilidad y capacidad de maniobra para el suministro de energía eléctrica al enorme territorio de la Unión Soviética. Para resolver este problema hay que construir líneas troncales de transporte de energía eléctrica a tensiones de 500 000, 750 000 y 1 150 000 V.

-
- ¿ ?
1. ¿Qué ventajas tiene la corriente alterna frente a la corriente continua?
 2. ¿En qué principio se basa el funcionamiento de los generadores de corriente alterna?
 3. ¿A qué se llama relación de transformación?
 4. ¿Cómo se efectúa la transmisión (el transporte) de la energía eléctrica a gran distancia?
-

- Ejercicio
1. ¿Cómo deben colocarse las láminas de acero aisladas unas de otras del núcleo del rotor de un generador de inducción, para que las corrientes de Foucault sean menores?
 - 3 2. Un cuadro (espira) rectangular de alambre gira en un campo magnético homogéneo. ¿En qué caso la f.e.m. inducida en dicho cuadro será máxima: cuando el plano del cuadro se encuentre en posición perpendicular a las líneas de inducción magnética o cuando esté en posición paralela a ellas?
 3. Los arrollamientos de un transformador están hechos de alambres de distinto grosor. ¿Cuál de los arrollamientos tiene mayor número de espiras?
 4. Idee un procedimiento para determinar el número de espiras del arrollamiento de un transformador sin desbobinarlo.
 5. ¿Qué puede ocurrir si un transformador se conecta casualmente a una fuente de corriente continua?
 6. Si en un arrollamiento de un transformador se cierra una espira, el transformador se estropea, ¿por qué?
 7. Determinar el número de pares de polos que tiene el rotor de uno de los generadores de la CHE de Bratsk (en el río Angará), si la frecuencia con que gira dicho rotor es de 125 r.p.m.
 8. Hallar las relaciones de transformación de todos los transformadores que deben utilizarse en la transmisión de energía eléctrica desde el generador hasta los consumidores, de acuerdo con el esquema que se da en la fig. 57. (Despreciar las pérdidas de energía.)
-

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 3

La corriente eléctrica se obtiene principalmente en los generadores electromecánicos de inducción (alternadores). Estos generadores transforman la energía mecánica en energía de la corriente eléctrica. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. Valiéndose de dispositivos simples la energía eléctrica se puede transformar en cualquier otra forma de energía.

La corriente eléctrica alterna se transforma a un valor mayor o menor de la tensión por medio de los transformadores. El transformador consiste en dos arrollamientos montados en un núcleo de acero. Su objeto es aumentar o disminuir la tensión y la intensidad de la corriente con pérdidas mínimas de energía.

La variación de la tensión que se obtiene con un transformador viene dada por la relación del número de espiras n_1 del arrollamiento primario al número de espiras n_2 del arrollamiento secundario:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

La intensidad de la corriente disminuye (aumenta) tantas veces como veces aumenta (disminuye) la tensión:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

Las pérdidas de energía en los conductores son proporcionales al cuadrado de la intensidad de la corriente. La potencia que se transmite es, en cambio, proporcional al producto de la intensidad de la corriente por la tensión. Por eso, el transporte de energía eléctrica por cables es conveniente hacerlo a alta tensión y con poca intensidad de corriente. En las centrales eléctricas los transformadores elevan la tensión antes de transmitir la energía a grandes distancias. Al final de la línea de transporte se reduce la tensión por medio de otros transformadores y la corriente llega así a los consumidores.

La energía eléctrica se produce en centrales eléctricas térmicas, hidráulicas y atómicas (nucleares).

La cantidad de energía eléctrica producida es un índice importantísimo de la potencia económica de un país. La Unión Soviética ocupa el segundo puesto del mundo en producción de energía eléctrica.

4.1. Fenómenos ondulatorios

Todos hemos visto alguna vez que cuando se tira una piedra a la superficie tranquila de un estanque o un lago, desde el punto en que aquélla cae parten ondas en forma de anillos (fig. 58). Muchos habrán podido contemplar cómo las olas (ondas) del mar avanzan hacia la orilla. En las narraciones de viajes por mar suele hablarse de la monstruosa fuerza de las olas, que mecen como a cáscaras de nuez los buques más grandes. Pero al observar estos fenómenos no a todos se les ha ocurrido pensar que el sonido del chapoteo del agua llega a nuestro oído transportado por ondas del mismo aire que respiramos y que la luz, gracias a la cual podemos ver, también es un movimiento ondulatorio. Los procesos ondulatorios están extraordinariamente difundidos en la naturaleza. Las causas físicas que producen estos movimientos son diversas. Pero, lo mismo que las oscilaciones, todos los tipos de ondas se describen cuantitativamente por leyes iguales o casi iguales. Muchos problemas difíciles de comprender se hacen más inteligibles comparando entre sí distintos fenómenos ondulatorios.

Pero, ¿qué es una onda? ¿Por qué se originan las ondas?

Las partículas de todo cuerpo, sea sólido, líquido o gaseoso, interaccionan unas con otras. Por eso, si una partícula cualquiera del cuerpo empieza a oscilar, en virtud de la interacción entre las partículas, este movimiento comienza a propagarse con cierta velocidad en todos los sentidos.

Se llama onda una oscilación que se propaga en el espacio con el correr del tiempo.

En el aire, en los sólidos y dentro de los líquidos, las ondas mecánicas se originan en virtud de las fuerzas de elasticidad. Estas fuerzas efectúan la ligazón entre las distintas partes del cuerpo. En la formación de las ondas en la superficie del agua participan las fuerzas de la gravedad y de la tensión superficial.

Donde las peculiaridades fundamentales del movimiento ondulatorio se pueden ver más claramente es en el ejemplo de las ondas en la superficie del agua. Las ondas se presentan como oleadas circulares que avanzan. Las distancias entre las crestas de las olas son aproximadamente iguales. Pero si sobre el agua se deposita un objeto liviano, como, por ejemplo una caja de cerillas, éste no será arrastrado por la onda hacia delante, sino que empezará a oscilar verticalmente, permaneciendo casi exactamente en el mismo sitio.

Al propagarse la onda tiene lugar el desplazamiento de un estado determinado del medio que oscila, pero no un transporte de sustancia. La perturbación de la superficie del agua causada en un punto, por ejemplo por la caída de la piedra, se transmite a las zonas contiguas y poco a poco se propaga



Fig. 58

en todos los sentidos. Pero no aparece una corriente de agua: sólo se traslada la forma de la superficie.

VELOCIDAD DE ONDA. Una de las características más importantes de una onda es su velocidad. Cualquiera que sea su naturaleza, las ondas no se propagan en el espacio instantáneamente. Su velocidad ES FINITA. Podemos figurarnos, por ejemplo, que sobre el mar vuela una gaviota de manera que todo el tiempo se encuentra encima de la cresta de una misma ola. La velocidad de la ola (onda) en este caso será igual a la velocidad de la gaviota. Las ondas de la superficie del agua son fáciles de observar porque su velocidad de propagación es pequeña.

ONDAS TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES. No resulta difícil observar las ondas que se propagan a lo largo de un cordón de goma. Si uno de los extremos de éste se fija y, después de estirar suavemente el cordón, se hace con la mano que el otro extremo oscile, por dicho cordón avanzará una onda (fig. 59). La velocidad de la onda será tanto mayor cuanto más tenso esté el cordón. La onda avanzará hasta el punto de sujeción de éste, se reflejará y retrocederá. En este caso, al propagarse la onda, varía la forma del cordón. Cada trozo de éste oscila respecto de su posición invariable de equilibrio. Preste atención al hecho de que cuando se propaga la onda a lo largo del cordón cada uno de los trozos de éste oscila en dirección PERPENDICULAR a la de propagación de la onda (fig. 60). Estas ondas se llaman *transversales*.

Pero no toda onda es transversal. Las oscilaciones pueden originarse también *a lo largo* de la dirección en que se propaga la onda (fig. 61). En este caso se dice que la onda es *longitudinal*. Este tipo de onda conviene observarlo en un muelle largo y suave de gran diámetro. Si con la palma de la mano se da un golpe a uno de los extremos del muelle (fig. 62, a), se verá como la

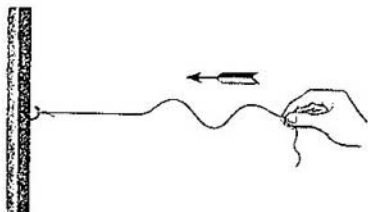


Fig. 59



Fig. 60



Fig. 61

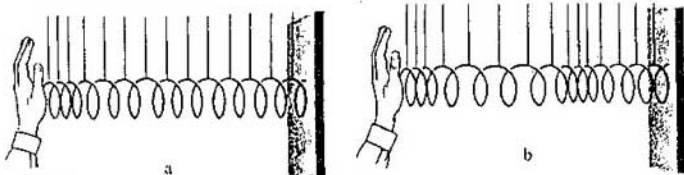


Fig. 62

compresión (impulso elástico) avanza por el muelle. Dando una serie de palmadas consecutivas se puede excitar en dicho muelle una onda, consistente en compresiones y extensiones sucesivas que avanzan una detrás de otra (fig. 62, b). Las oscilaciones de una espira cualquiera del muelle transcurren a lo largo de la dirección en que se propaga la onda. De las ondas mecánicas las que mayor importancia tienen son las sonoras. Pero el estudio de las ondas sonoras es más difícil que el de las ondas a lo largo de un cordón o de un muelle.

ENERGÍA DE UNA ONDA. Cuando se propaga una onda tiene lugar la transmisión del movimiento de una porción del cuerpo a otra. Con la transmisión del movimiento está relacionada la transmisión de energía¹⁾. La propiedad principal de todas las ondas, independientemente de su naturaleza, consiste en que transportan energía sin transportar sustancia. La energía procede de la fuente que excita las oscilaciones del extremo del cordón, de la cuerda, etc., y se propaga junto con la onda. Esta energía, por ejemplo, en el cordón se compone de la energía cinética del movimiento de las partes de éste y de la energía potencial de su deformación elástica. La disminución paulatina de la amplitud de las oscilaciones al propagarse la onda se debe a que una parte de la energía mecánica se transforma en interna.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. Las ondas mecánicas se propagan por una sustancia: gas, líquido o sólido. Pero existe un tipo de ondas que no

¹⁾ La idea de la propagación de la energía la introdujo, por primera vez en la física, el científico ruso N.A. ÚMOV (1846-1915).

necesita de sustancia alguna para propagarse. Éstas son las ondas electromagnéticas, a las cuales pertenecen, en particular, las ondas radieléctricas (hertzianas) y la luz. El campo electromagnético puede existir en el vacío, es decir, en un espacio que no contenga átomos. A pesar de que existen diferencias notorias entre las ondas electromagnéticas y las mecánicas, las primeras se comportan al propagarse de un modo semejante a las segundas. En particular, las ondas electromagnéticas tienen también velocidad finita y transportan consigo energía. Éstas son las propiedades más importantes de todo tipo de ondas.

4.2. Propagación de las ondas mecánicas

Pasemos ahora a estudiar más detalladamente el proceso de propagación de las ondas. Vamos a seguir el movimiento de partículas separadas de la sustancia durante el movimiento ondulatorio. Consideraremos primeramente una onda TRANSVERSAL que se propaga, por ejemplo, a lo largo de un cordón de goma.

Cada trocito del cordón posee masa y elasticidad. Cuando el cordón se deforma, en cualquiera de sus secciones aparecen fuerzas de elasticidad. Estas fuerzas tienden a hacer volver el cordón a su posición inicial. En virtud de la inercia el trocito de cordón oscilante no se detiene en la posición de equilibrio, sino que pasa por ella y sigue moviéndose hasta que las fuerzas de elasticidad lo obligan a que se pare en el instante en que su elongación es máxima.

En vez de un cordón real, tomemos una serie de bolitas metálicas iguales suspendidas por hilos. Las bolitas están unidas entre sí por muellecitos (fig. 63). La masa de los muellecitos es mucho menor que la de las bolitas. En este modelo las propiedades inerciales (masa) y elásticas resultan separadas: la masa se concentra principalmente en las bolitas y la elasticidad, en los muellecitos. Esta separación carece de importancia cuando se trata de estudiar el movimiento ondulatorio.

Si la bolita extrema izquierda se desvía en el plano horizontal, el muellecito se deforma y sobre la 2ª bolita empieza a actuar una fuerza que la obliga a desviarse hacia el mismo lado en que se desvió la 1ª. Debido a la inercia, el movimiento de la 2ª bolita no se produce de acuerdo con el de la 1ª. Su movimiento, que repetirá el de la 1ª bolita, estará retrasado en el tiempo.

Si la 1ª bolita se hace oscilar con un período T (simplemente con la mano o por medio de un mecanismo cualquiera), la 2ª bolita también empieza

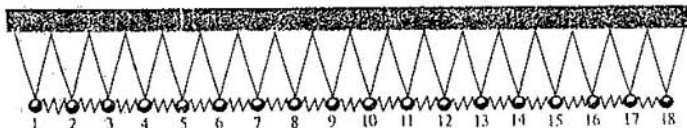


Fig. 63

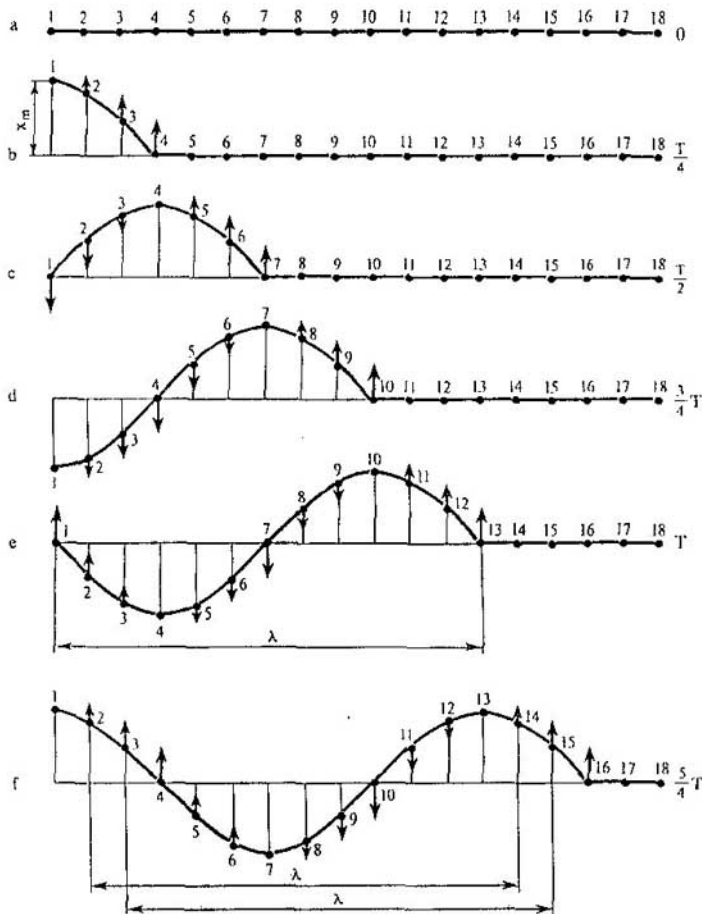


Fig. 64

a oscilar detrás de la primera, pero con cierto retraso de fase. La 3ª bolita, influida por la elasticidad producida por el movimiento de la 2ª, comienza a oscilar a su vez con un retraso de fase aún mayor, y así sucesivamente. Por fin, todas las bolitas realizan oscilaciones forzadas con una misma frecuencia, pero en fases distintas. Con esto, a lo largo de la fila de bolitas avanzará una onda transversal.

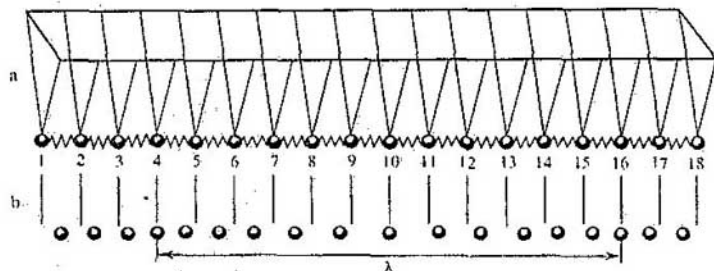


Fig. 65

La fig. 64, a, b, c, d, e, f representa el proceso de propagación de la onda. En ella se muestran las posiciones de las bolitas en instantes sucesivos separados entre sí por un cuarto de período (vista desde arriba). Las flechas aplicadas a las bolitas son los vectores velocidad de su movimiento en los respectivos instantes.

En el modelo de cuerpo elástico en forma de serie de bolitas con masa unidas entre sí por muellecitos (fig. 65, a) se puede observar el proceso de propagación de las ONDAS LONGITUDINALES. Las bolitas están suspendidas de tal modo que sólo pueden oscilar a lo largo de la fila. Si la 1ª bolita se hace oscilar con un período T , a lo largo de la fila avanzará una onda longitudinal formada por una sucesión de condensaciones y enrarecimientos de bolitas (fig. 65, b).

4.3. Longitud de onda. Velocidad de onda

Una vez que las oscilaciones, al propagarse la onda transversal, llegan a la 13ª bolita, las bolitas 1ª y 13ª oscilarán de manera idéntica. Cuando la 1ª se encuentra en la posición de equilibrio y se mueve hacia la izquierda (véase la fig. 64, e), la 13ª también se halla en la posición de equilibrio y se mueve hacia la izquierda. Al cabo de un cuarto de período la desviación (elongación) de la 1ª bolita hacia la izquierda será máxima y en la misma posición se encontrará la 13ª (véase la fig. 64, f). Las oscilaciones de estas bolitas se cumplen en la misma fase¹⁾. La distancia entre los dos puntos más próximos entre sí que oscilan en la misma fase se llama longitud de onda. Por consiguiente, las distancias entre las bolitas 1ª y 13ª, 2ª y 14ª, 3ª y 15ª son iguales a la longitud de onda (véase la fig. 64, e y f). La longitud de onda se designa por la letra griega λ (lambda).

La longitud de la onda longitudinal, de acuerdo con la fig. 65, b, es igual a la distancia entre las bolitas 2ª y 14ª o entre la 4ª y la 16ª.

¹⁾ Más exactamente, las oscilaciones de la 13ª bolita tienen un retraso en fase, respecto de las oscilaciones de la 1ª, de 2π . Pero como $\cos(\omega t - 2\pi) = \cos \omega t$, esta diferencia de fase no implica diferencia en los estados de las bolitas oscilantes y puede decirse que éstas oscilan en la misma fase.

Durante la propagación de la onda, distintos puntos del cuerpo (bolitas en el modelo que consideramos) oscilan en fases diferentes siempre que la distancia entre ellos no sea igual a $n\lambda$ (siendo n un número entero).

Las bolitas 1^a y 7^a (véase la fig. 64), que se encuentran entre sí a la distancia $\lambda/2$, oscilan en oposición de fase: cuando la 1^a se mueve hacia la izquierda, la 7^a lo hace hacia la derecha y viceversa.

En un período la onda se propaga la distancia λ (véase la fig. 64 e). Por lo tanto su velocidad se define por la fórmula

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (4.1)$$

Como el período T y la frecuencia ν están relacionados por la fórmula

$$T = \frac{1}{\nu},$$

resulta que

$$v = \lambda\nu. \quad (4.2)$$

La velocidad de onda es igual al producto de la longitud de onda por la frecuencia de las oscilaciones.

En la propagación de la onda por el cordón se manifiesta una doble periodicidad.

EN PRIMER LUGAR, cada partícula del cordón efectúa oscilaciones periódicas en el tiempo. En el caso de las oscilaciones armónicas (estas oscilaciones se cumplen según la ley sinusoidal o cosinusoidal) la frecuencia y la amplitud de las oscilaciones son iguales en todos los puntos. Las oscilaciones sólo se diferencian por sus fases.

EN SEGUNDO LUGAR, en un instante dado la forma de la onda se repite en el espacio a lo largo del cordón con intervalos de longitud iguales a λ . En la fig. 66 se muestra el perfil de la onda en un instante determinado (línea negra). Con el tiempo toda esta figura se desplaza de izquierda a derecha con la velocidad v .

Al cabo de un intervalo de tiempo Δt , la onda tendrá la forma representada en la misma figura con trazo azul.

Para la onda longitudinal también es válida la fórmula (4.2), que relaciona la velocidad de propagación de la onda, la longitud de ésta y la frecuencia de las oscilaciones.

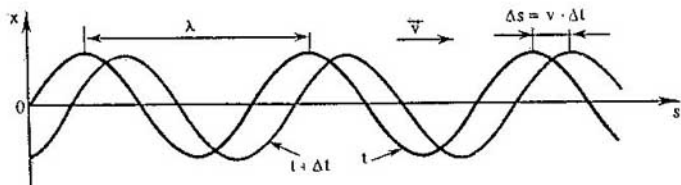


Fig. 66

¿ ?

1. ¿Qué es una onda?
2. ¿En qué difieren las ondas transversales y longitudinales? Ponga ejemplos de estos tipos de ondas.
3. ¿Cuáles son las peculiaridades fundamentales del movimiento ondulatorio?
4. ¿A qué se llama longitud de onda?
5. ¿Cómo está relacionada la velocidad de onda con la longitud de onda?
6. Determine ateniéndose a la fig. 64 la diferencia de fase entre dos bolitas oscilantes vecinas.

4.4. Ondas en un medio

En un cordón de goma, en una cuerda o en una varilla las ondas sólo pueden avanzar en una dirección, a lo largo de ellas. Pero si un gas, un líquido o un sólido llenan totalmente cierta región del espacio (medio continuo), las oscilaciones que se originan en un punto se propagan en todas las direcciones.

La onda, al propagarse desde cualquier fuente o foco en un medio continuo, abarca poco a poco una región del espacio cada vez mayor. Esto se ve bien en la fig. 58, en la cual se muestran las ondas circulares producidas en la superficie del agua por la caída de una piedra. La energía que llevan consigo las ondas desde la fuente, se distribuye con el tiempo en una región cada vez mayor del espacio. Por eso la energía transportada en un segundo a través de la unidad de superficie disminuye a medida que la onda se aleja del foco. Por consiguiente, también disminuye la amplitud de las oscilaciones a medida que se alejan de la fuente, ya que la energía del cuerpo oscilante es proporcional al cuadrado de la amplitud (véase el § 1.8). Esto es correcto no sólo para las oscilaciones de un cuerpo sujeto a un muelle o de un péndulo, sino para cualquier partícula de un medio.

Así, pues, la amplitud de la onda en un medio disminuye necesariamente a medida que se aleja de su fuente, incluso si la energía mecánica no se transforma en interna, a causa de la acción de las fuerzas de rozamiento en el medio.

Constituye una excepción la llamada *onda plana*. Esta onda se puede obtener si en un medio elástico se introduce una placa grande y se hace que oscile en dirección a la normal. Todos los puntos del medio próximos a la placa realizarán oscilaciones de la misma amplitud y en una misma fase. Estas oscilaciones se propagarán en forma de ondas en dirección de la normal a la placa, con la particularidad de que todas las partículas del medio que se hallen en un plano paralelo a la placa oscilarán en la misma fase. *Las superficies de igual fase se denominan superficies de onda*. En el caso de la onda plana las superficies de onda son planos (fig. 67). Una onda real sólo puede considerarse plana aproximadamente (porque en los bordes la superficie de onda se curva).

Toda recta normal a una superficie de onda se llama rayo. Se entiende por dirección de propagación de las ondas la dirección de los rayos. Los rayos de las ondas planas son rectas paralelas. A lo largo de los rayos se efectúa el transporte de energía.

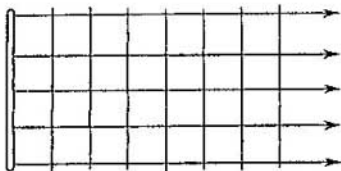


Fig. 67

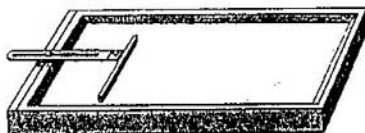


Fig. 68

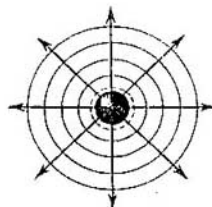


Fig. 69

Al propagarse la onda plana las dimensiones de las superficies de onda no varían (o casi no varían) a medida de alejarse de la placa. Por eso la energía de la onda no se dispersa en el espacio y la amplitud de las oscilaciones sólo disminuye a causa de la acción de las fuerzas de rozamiento.

En la superficie del agua es fácil obtener ONDAS LINEALES, que dan una imagen comprensible de las ondas planas en el espacio. Para esto hay que hacer que una varilla toque ligeramente la superficie del agua y oscile en dirección perpendicular a dicha superficie. Todas las partículas del agua que se encuentren en una recta paralela a la varilla oscilarán en una misma fase (fig. 68).

Otro ejemplo de onda en un medio continuo es la *onda esférica*. Esta onda se origina si en el medio se introduce una esfera pulsante (fig. 69). En este caso las superficies de onda son esferas. Los rayos están dirigidos a lo largo de las prolongaciones de los radios de la esfera pulsante.

La amplitud de las oscilaciones de las partículas en el caso de la onda esférica disminuye necesariamente a medida que ésta se aleja del foco. La energía emitida por este último se distribuye, en este caso, uniformemente por la superficie de la esfera, cuyo radio va creciendo continuamente a medida que se propaga la onda.

Como se sabe, las ondas pueden ser transversales y longitudinales. En la onda transversal el desplazamiento de las distintas partes del medio se realiza en dirección perpendicular a la de propagación de la onda. Con esto se origina una deformación elástica llamada deformación de esfuerzo cortante o de cizallamiento. Unas capas de la sustancia se desplazan respecto de otras. El volumen del cuerpo no varía. Durante la deformación de cizallamiento se originan en el sólido fuerzas elásticas que tienden a hacer volver el cuerpo a su estado inicial. Estas fuerzas son precisamente las que provocan las oscilaciones de las partículas del medio.

El deslizamiento de unas capas respecto de otras en los gases y en los liqui-

dos no hace que aparezcan fuerzas de elasticidad. Por eso en los gases y en los líquidos no pueden existir ondas transversales. Las ondas transversales sólo se producen en los sólidos¹⁾.

En la onda longitudinal tiene lugar la deformación por compresión (véase el § 4.1). Las fuerzas de elasticidad, ligadas a esta deformación, se originan tanto en los sólidos, como en los líquidos y en los gases. Estas fuerzas producen las oscilaciones de las distintas partes del medio. Por eso las ondas longitudinales se pueden propagar en todos los medios.

En los sólidos la velocidad de las ondas longitudinales es mayor que la velocidad de las ondas transversales. Esta circunstancia se aprovecha para determinar la distancia desde el epicentro de un terremoto hasta el observatorio sísmico. En éste se registra primero la onda longitudinal, ya que su velocidad en la corteza terrestre es mayor que la de la transversal. Al cabo de cierto tiempo se registra la onda transversal, excitada al producirse el terremoto al mismo tiempo que la longitudinal. Conociendo la velocidad de las ondas longitudinales y transversales en la corteza terrestre y el tiempo en que se retrasa la onda transversal, se puede hallar la distancia hasta el epicentro del terremoto.

4.5. Ondas sonoras

EXCITACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS. Las ondas en la superficie del agua o a lo largo de un cordón de goma se pueden ver directamente. En un medio transparente, como el aire o el agua, las ondas no se ven. Pero en determinadas condiciones se pueden oír. Si una regla de hierro larga se sujeta en un tornillo de mordazas o se aprieta al borde de una mesa y su extremo libre se desvía de la posición de equilibrio, excitamos en ella oscilaciones (fig. 70, *a*). Pero estas oscilaciones no serán percibidas por nuestro oído. No obstante, si acortamos la parte saliente de la regla (fig. 70, *b*), notaremos que ésta empezará a sonar.

La regla comprime la capa de aire que está en contacto con ella por una parte y, al mismo tiempo, crea cierto enrarecimiento en la otra parte. Estas compresiones y enrarecimientos se suceden con el tiempo y se propagan en ambos sentidos en forma de una onda elástica longitudinal. Ésta llega a nuestro oído y provoca cerca de él oscilaciones periódicas de la presión, las cuales actúan sobre el aparato auditivo.

El oído humano percibe en forma de sonido las oscilaciones cuya frecuencia se encuentra entre los límites de 17 a 20 000 Hz. Estas oscilaciones se llaman *acústicas*. *La acústica es la ciencia que estudia el sonido*. Cuanto más corta sea la parte saliente de la regla, tanto mayor será la frecuencia de las oscilaciones. Por eso empezamos a oír el sonido cuando el extremo de la regla se hace suficientemente corto.

Todo cuerpo (sólido, líquido o gaseoso) que oscile con frecuencia sonora crea en el medio circundante una onda sonora.

¹⁾ Ondas transversales se originan también en la superficie de los líquidos, pero no dentro de ellos.

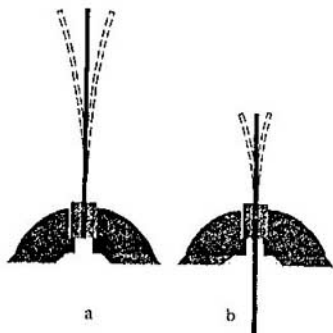


Fig. 70

ONDAS SONORAS EN DISTINTOS MEDIOS. Lo más frecuente es que las ondas sonoras lleguen a nuestro oído por el aire. Es poco corriente que nos encontremos totalmente sumergidos en el agua. Pero está claro que el aire no posee privilegio alguno respecto a otros medios, en el sentido de la posibilidad de propagación en él de las ondas sonoras. Si uno se tira de cabeza al agua cuando se está bañando, podrá escuchar el sonido que produce el choque de dos piedras dentro del agua a una distancia grande (fig. 71).

La tierra conduce bien el sonido. El conocido historiador ruso N. M. KARAMZIN escribe cómo Dmitri DONSKÓI, antes de la batalla del campo de Kulikovo (1380), aplicó su oído al suelo y oyó el trote de la caballería tártara, antes de que ésta pudiera verse.

Si se aplica de lleno al oído el extremo de una larga regla de madera y se golpea ligeramente con la mano el otro extremo, el sonido se oye claramente. Pero si la regla se retira un poco del oído, se notará que el sonido casi deja de ser perceptible.

En el vacío no se pueden propagar las ondas sonoras. Para demostrar esto se puede colocar un timbre eléctrico debajo de la campana de una máquina



Fig. 71

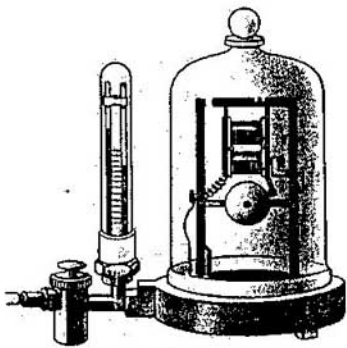


Fig. 72

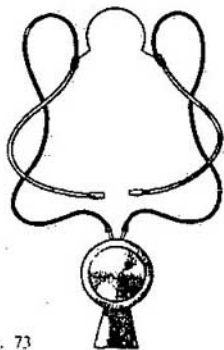


Fig. 73

neumática (fig. 72). A medida que la presión del aire debajo de la campana va disminuyendo, el sonido se debilita hasta que por fin deja de oírse.

Conducen mal el sonido los materiales como el fieltro, los tableros de material poroso, el corcho prensado y otros. Estos materiales se utilizan para aislamientos isonorizantes, es decir, para proteger locales contra la penetración en ellos de sonidos extraños.

IMPORTANCIA DEL SONIDO. Para poder orientarse con seguridad en el mundo, nuestro cerebro debe recibir información sobre lo que ocurre en el medio que nos rodea. La vista y el oído desempeñan en esto el papel principal. El tacto, el olfato y el gusto tienen menos importancia.

Es natural que la cantidad mayor de información la recibimos por medio de la luz. La luz emitida por los focos (como el Sol, una lámpara, etc.) se refleja en los objetos que nos rodean e incidiendo en nuestros ojos permite hacernos una idea de su posición y movimiento. Muchos objetos son luminosos de por sí.

Las ondas sonoras reflejadas en los objetos o las ondas emitidas por los objetos que suenan, también nos facilitan información sobre el mundo que nos rodea. Pero lo más importante es la palabra. Nosotros creamos y percibimos ondas sonoras y de este modo nos relacionamos unos con otros.

Escuchando por medio de aparatos especiales, como, por ejemplo, el fonendoscopio médico (fig. 73), los sonidos del organismo, se pueden obtener datos importantes acerca del funcionamiento del corazón y de otros órganos internos.

VELOCIDAD DEL SONIDO. Las ondas sonoras, lo mismo que todas las demás ondas, se propagan con velocidad finita. Esto se puede poner de manifiesto como sigue. La luz se propaga con una velocidad enorme (de 300 000 km/s). Por eso el relámpago de un disparo llega casi instantáneamente a nuestros ojos. Pero el sonido del mismo disparo nos llega con un retraso apreciable. Lo mismo ocurre cuando se mira desde lejos un partido de fútbol. Primero se ve la patada al balón, y sólo al cabo de cierto tiempo se oye el sonido del golpe. Posiblemente todos habrán observado que durante las tormentas el relámpago antecede siempre al trueno. Si la tormenta está lejos, el retraso del



Fig. 74

trueno llega a ser de varias decenas de segundos. Finalmente, debido a que la velocidad del sonido es finita, se produce el eco. El eco es la onda sonora reflejada en el lindero de un bosque, en una ribera escarpada, en un edificio, etc.

La velocidad del sonido en el aire a 0°C es igual a 331 m/s . Esta velocidad es bastante grande. Sólo hace muy poco los aviones empezaron a volar a velocidades que superan la del sonido.

La velocidad del sonido en el aire no depende de la densidad de éste. Esta velocidad es aproximadamente igual a la velocidad media del movimiento térmico de las moléculas y, lo mismo que ella, es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. Cuanto mayor sea la masa de las moléculas del gas, tanto menor será la velocidad del sonido en él. Así, a 0°C la velocidad del sonido en el hidrógeno es de 1270 m/s , y en el anhídrido carbónico, de 258 m/s .

En el agua la velocidad del sonido es mayor que en el aire. Dicha velocidad fue medida por primera vez en 1827 en el lago de Ginebra, en Suiza. En una barca se inflamaba un poco de pólvora al mismo tiempo que debajo del agua se hacía sonar una campana (fig. 74, a). Otra barca se hallaba a 14 km de distancia de la primera. El sonido se captaba por medio de una bocina sumergida en el agua (fig. 74, b). Ateniéndose a la diferencia del tiempo transcurrido, entre el destello de luz y la llegada de la señal acústica, se determinó la velocidad del sonido. A la temperatura de 8°C la velocidad del sonido en el agua resultó ser de 1435 m/s .

En los sólidos la velocidad del sonido es aún mayor que en los líquidos. Por ejemplo, en el acero la velocidad del sonido a 15°C es igual a 4980 m/s . El hecho de que la velocidad del sonido en un sólido es mayor que en el aire se puede comprobar como sigue. Haga que un colaborador suyo dé un golpe al extremo de un rail y aplique al otro extremo el oído, oirá dos golpes: el primero llegará a su oído por el rail, el segundo, por el aire.



Conociendo la frecuencia de las oscilaciones y la velocidad del sonido en el aire, se puede calcular la longitud de la onda sonora (véase el § 4.3). Las ondas más largas que percibe el oído tienen la longitud $\lambda \approx 17$ m, y las más cortas, la longitud $\lambda \approx 17$ mm.

4.6. Sonidos musicales y ruidos. Intensidad y altura de un sonido

Los sonidos que escuchamos a diario son muy diversos. Cualquier persona distingue los llamados *sonidos musicales* de los ruidos. A los primeros pertenecen el canto, el sonido de las cuerdas tensas de los instrumentos musicales, el silbo, etc. Los ruidos los producen las explosiones, el funcionamiento de los motores de combustión interna, el silbido de la serpiente, el chirrido de las bisagras mal engrasadas de las puertas, etc. Valiéndonos de nuestros órganos articulatorios podemos reproducir un sonido más o menos armonioso y, naturalmente, un ruido.

SONIDOS MUSICALES. ¿En qué se diferencian, desde el punto de vista de la física, los sonidos musicales del ruido y por qué los primeros pueden ser tan diferentes entre sí?

Un sonido musical puro se puede obtener con un instrumento muy simple llamado *diapasón*.

El diapasón es una varilla metálica doblada en forma de U y sujeta por su parte central a un vástago o pie. En la fig. 75 se muestra un diapasón montado sobre una caja de madera abierta por un lado. Si una de las ramas del diapasón se golpea con un martillito, se oye un sonido musical. Este sonido se va debilitando paulatinamente debido a que las oscilaciones de las ramas se amortiguan. La onda sonora es excitada por las ramas vibrantes del diapasón.

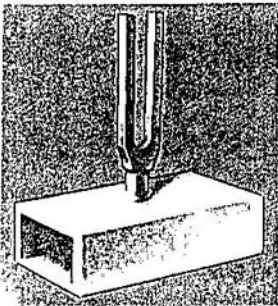


Fig. 75

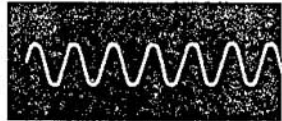


Fig. 76

El carácter de estas vibraciones puede determinarse sujetando a una de las ramas del diapasón una aguja y haciendo que ésta se deslice con velocidad constante por la superficie de una lámina de vidrio ahumada. Sobre la lámina la aguja traza una línea muy parecida a la sinusoides (fig. 76). Este desarrollo con el tiempo de las oscilaciones es semejante al que se obtiene por medio del péndulo provisto de embudo con arena. De esto se puede deducir que las oscilaciones (vibraciones) de las ramas del diapasón se aproximan mucho a las armónicas.

El sonido que emite un cuerpo oscilando armónicamente se llama tono musical o simplemente tono.

Los tonos musicales se distinguen de oído por su intensidad y altura. ¿De qué magnitudes físicas dependen la intensidad y la altura del tono?

INTENSIDAD DEL SONIDO. La intensidad del sonido está determinada por la amplitud de las oscilaciones. Cuanto más fuerte sea el golpe dado con el martillito al diapasón, tanto más intenso será el sonido emitido por éste. Entre tanto un golpe más fuerte provoca oscilaciones de mayor amplitud. No cabe duda de que la intensidad de un sonido cualquiera también depende de la amplitud de las oscilaciones en la onda sonora.

No obstante, debe tenerse en cuenta que la sensibilidad de nuestro oído depende de la frecuencia del sonido. Oscilaciones sonoras de amplitudes iguales no nos parecen de la misma intensidad si sus frecuencias son distintas. La sensibilidad máxima del oído humano corresponde a las oscilaciones cuya frecuencia es, aproximadamente, de 3500 Hz.

ALTURA DEL SONIDO. Para definir a qué se debe cierta altura del sonido hay que disponer de varios diapasones de dimensiones distintas. Haciendo deslizarse a lo largo de una placa ahumada la aguja sujeta a una de las ramas del diapason que suena, se puede notar que cuanto más alto sea el sonido que emite el diapason, tanto menor será el período de la sinusoides que traza en la placa y, por consiguiente, tanto mayor la frecuencia de las oscilaciones del diapason. La altura del sonido se debe a la frecuencia de las oscilaciones.

Lo mismo puede observarse cuando oscila una cuerda. El aumento de la tensión de la cuerda hace que crezca la frecuencia de las oscilaciones libres. Por eso, tensando las cuerdas de una guitarra con las clavijas, hacemos que el sonido sea más alto.

A la gama de la voz humana corresponde el intervalo de frecuencias de 70 a 10 000 ó 12 000 Hz.

¿QUÉ ES EL RUIDO? El ruido se diferencia del tono musical en que a él no le corresponde una frecuencia bien determinada de las oscilaciones y, por lo tanto, una determinada altura del sonido. En el ruido están presentes oscilaciones de todas las frecuencias posibles.

4.7. Resonancia acústica

Un cuerpo que suena puede efectuar tanto oscilaciones libres como oscilaciones forzadas, bajo la acción de una fuerza periódica exterior. Cuando la frecuencia de la fuerza exterior coincide con la frecuencia propia de las oscilaciones, empieza la resonancia.

Para observar la *resonancia acústica* lo más fácil es valerse de dos diapasones iguales. Dispongamos estos diapasones a poca distancia entre sí de manera que los lados abiertos de sus cajas estén uno frente a otro (fig. 77). Si

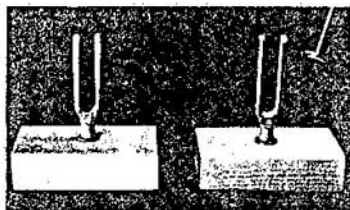


Fig. 77

con el martillito damos un golpe a una de las ramas de un diapasón y luego atenúamos las vibraciones con la mano, observaremos que el otro diapasón empieza a sonar. La onda sonora del primer diapasón crea una fuerza periódica que actúa sobre el segundo diapasón. Las frecuencias propias de ambos diapasones son iguales y la amplitud de las oscilaciones del segundo resulta ser grande. Si se toman diapasones con frecuencias propias diferentes, cuando se excite el primero el segundo prácticamente no sonará. En el caso de los diapasones iguales bastará sujetar a una de las ramas de uno de ellos una abrazadera liviana para que la resonancia ya no se produzca.

El amortiguamiento de un diapasón es pequeño, por lo que la curva de resonancia es muy aguda (véase el § 1.9).

4.8. Ultrasonido

Cuando las frecuencias son menores que 17 o mayores que 20 000 Hz las oscilaciones de la presión ya no son percibidas por el oído humano. Las ondas longitudinales con frecuencia de oscilación inferior a 17 Hz reciben el nombre de *infrasonido*. El infrasonido, hasta ahora, se utiliza poco en la técnica.

Las ondas longitudinales con frecuencia superior a 20000 Hz se llaman *ultrasonido*. El ultrasonido se emplea en la técnica y desempeña un gran papel en la vida de los animales. Los murciélagos, los delfines y algunos insectos emiten y captan el ultrasonido.

Para obtener ultrasonido de gran intensidad se emplean vibradores especiales cuyo funcionamiento se basa en que ciertos cristales (cuarzo, sal de la Rochela, turmalina) tienen la propiedad de que sus dimensiones varían si se someten a la acción de un campo eléctrico. En dependencia de la dirección del campo los cristales se comprimen o se alargan.

Una lámina de cuarzo situada dentro de un condensador plano, al cual se aplica tensión alterna, realiza oscilaciones forzadas. Todo cuerpo elástico, incluido el cuarzo, posee frecuencias propias. Cuando la frecuencia del campo eléctrico alterno coincide con la frecuencia propia de la lámina de cuarzo, empieza la resonancia y la amplitud de las oscilaciones aumenta mucho. Esta lámina, sumergida en el agua, puede emitir ondas de hasta varios kilovatios de potencia por cada centímetro de superficie. Tiene importancia que, por medio de las ondas cortas, se pueden crear estrechos haces dirigidos, cuyo ensanchamiento a medida que se propagan es insignificante.

Una onda ultrasónica potente es capaz de triturar cuerpos colocados en un líquido (los trocitos de metal se transforman en fina suspensión). El ultrasonido ejerce una enérgica acción biológica. Los microbios perecen en el campo del ultrasonido. Por medio del ultrasonido se puede esterilizar la leche y otros productos.

En los líquidos las ondas ultrasónicas se amortiguan más débilmente que en el aire. Por eso el ultrasonido se aplica en la *hidroacústica*. El aparato más importante es la *sonda de eco*, *hidrolocalizador* o *sonar*. Emitiendo impulsos cortos de ondas ultrasónicas se puede captar su reflexión en el fondo del mar o en otros objetos. Por el retraso de la señal reflejada se puede determinar la

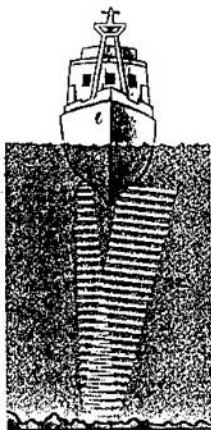


Fig. 78

distancia a que se encuentra el obstáculo. Así se mide la profundidad del mar (fig. 78) y se descubren los bancos de peces, los icebergs o los submarinos.

Por la reflexión del ultrasonido en los rechupes o las grietas de las piezas metálicas de fundición se pueden descubrir los defectos que éstas tienen.

En medicina se utiliza mucho el ultrasonido para la diagnosis y con fines curativos (soldadura de huesos fracturados, curación de articulaciones y de procesos inflamatorios).

Los delfines y los murciélagos tienen localizadores ultrasónicos extraordinariamente perfectos. Los primeros se orientan con seguridad en el agua turbia, emitiendo ultrasonidos y captando su reflexión en los objetos o presas.

Los murciélagos pueden volar sin dificultad en una habitación totalmente oscura, en la cual se hayan tendido multitud de cuerdas en todas las direcciones posibles. Sus oídos sustituyen eficazmente a los ojos. El murciélago emite impulsos de oscilaciones ultrasónicas. Las frecuencias de estas oscilaciones en el impulso es de 25 000 a 50 000 Hz. La duración de cada impulso no supera 0,015 s.

¿ ?

1. ¿Qué onda se llama plana y cuál esférica?
2. ¿Por qué no existen ondas transversales en los gases y en los líquidos?
3. ¿Qué oscilaciones llevan el nombre de acústicas?
4. ¿De qué depende la velocidad del sonido en el aire?
5. ¿Qué es lo que define la intensidad y la altura del sonido?

4.9. Interferencia de ondas

COMPOSICIÓN DE LAS ONDAS. Hasta ahora sólo hemos tomado en consideración una onda que se propaga desde una fuente o foco. Sin embargo, muy a menudo en un mismo medio se propagan simultáneamente varias ondas. Por ejemplo, cuando en una habitación hablan varias personas, las distintas ondas sonoras se superponen unas a otras. ¿Qué ocurre con esto?

Este fenómeno es más fácil de estudiar observando las ondas sobre la superficie del agua. Si lanzamos dos piedrecitas al agua, creando así dos ondas anulares, es fácil ver que cada onda pasa a través de la otra y se comporta después como si esta segunda onda no existiera en absoluto. De esta misma manera un número cualquiera de ondas sonoras puede simultáneamente propagarse en el aire sin estorbarse lo más mínimo unas a otras. El conjunto de instrumentos musicales de una orquesta o de voces de un coro crea ondas sonoras que nuestro oído percibe al mismo tiempo, pudiendo distinguir un sonido de otro.

Veamos ahora más atentamente lo que ocurre en los puntos en que las ondas se superponen una a otra. Observando las ondas que sobre la superficie del agua producen las dos piedrecitas lanzadas, nos cercioraremos de que ciertas regiones de la superficie no se han perturbado, pero en otras la perturbación ha aumentado.

Sí en un punto se encuentran las crestas de dos ondas, en este punto la perturbación del agua se refuerza.

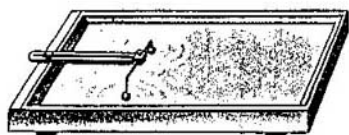


Fig. 79

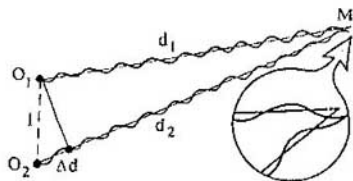


Fig. 80

Si, por el contrario, la cresta de una onda se encuentra con el valle o depresión de otra, en la superficie del agua no habrá perturbación.

En general, en cada punto del medio las oscilaciones provocadas por dos ondas simplemente se suman. La elongación resultante de cualquier partícula del medio será igual a la suma de las elongaciones que se producirían si cada una de las ondas se propagara en ausencia de la otra.

INTERFERENCIA. La composición en el espacio de dos o más ondas, en caso de la cual se origina una distribución, constante con el tiempo, de la amplitud de las oscilaciones resultantes en distintos puntos del espacio, se llama interferencia.

Aclaremos en qué condiciones se produce la interferencia de ondas. Para esto consideremos más detalladamente la composición de las ondas sobre la superficie del agua.

En una cubeta con agua se pueden excitar al mismo tiempo dos ondas circulares por medio de dos bolitas sujetas a una varilla que realice oscilaciones armónicas (fig. 79). En un punto cualquiera M de la superficie del agua (fig. 80) se compondrán las oscilaciones generadas por las dos ondas (procedentes de los focos O_1 y O_2). Las amplitudes de las oscilaciones producidas en el punto M por ambas ondas, en general, se diferenciarán, ya que dichas ondas recorren caminos distintos d_1 y d_2 . Pero si la distancia l entre los focos es mucho menor que la longitud de estos caminos ($l \ll d_1$ y $l \ll d_2$), ambas amplitudes se pueden considerar prácticamente iguales.

El resultado de la composición de las ondas que llegan al punto M dependerá de la diferencia de fase entre ellas. Como recorren distancias distintas, d_1 y d_2 , las ondas tienen una diferencia de marcha (o recorrido) $\Delta d = d_2 - d_1$. Si esta diferencia es igual a la longitud de onda λ , la segunda onda se retrasará, respecto de la primera, exactamente en un período (porque precisamente en un período la onda recorre un camino igual a la longitud de onda). Por consiguiente, en este caso tanto las crestas como los valles de ambas ondas coincidirán.

CONDICIÓN DE LOS MÁXIMOS. La fig. 81 representa la gráfica de las elongaciones x_1 y x_2 originadas por las dos ondas cuando $\Delta d = \lambda$, en función del tiempo. La diferencia de fase de las oscilaciones es nula (o, lo que es lo mismo, 2π , ya que el período del seno es igual a 2π). La composición de estas dos oscilaciones da una oscilación resultante de amplitud dos veces mayor. Las oscilaciones de la elongación resultante x se representan en la fig. 81 con línea azul. Lo mismo ocurrirá si en el trozo Δd caben no una, sino un número entero cualquiera de longitudes de onda.

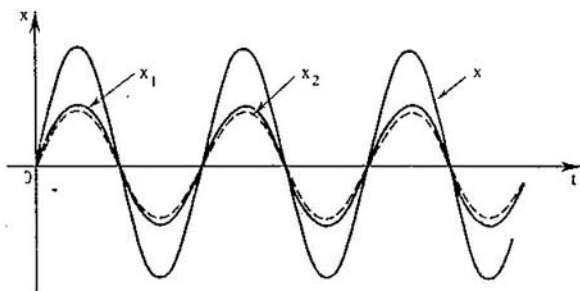


Fig. 81

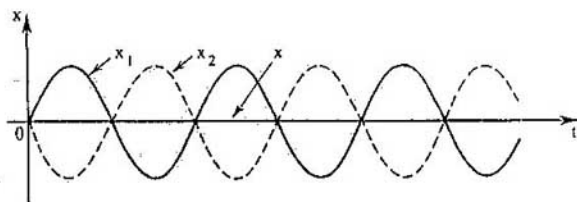


Fig. 82

La amplitud de las oscilaciones del medio en un punto dado será máxima si la diferencia de marcha de dos ondas, que excitan las oscilaciones en dicho punto, es igual a un número entero de longitudes de onda¹⁾:

$$\Delta d = k\lambda, \quad (4.3)$$

siendo $k = 0, 1, 2, \dots$

CONDICIÓN DE LOS MÍNIMOS. Veamos ahora lo que ocurre cuando en el segmento Δd cabe media longitud de onda. Es evidente que la segunda onda se retrasará de la primera medio período. La diferencia de fase resulta ser igual a π , es decir, las oscilaciones se generarán en oposición de fase. Como resultado de la composición de estas oscilaciones la amplitud de la oscilación resultante será nula, o sea, en el punto considerado no se producirán oscilaciones (fig. 82). Lo mismo sucede si en el segmento Δd cabe un número impar cualquiera de semilongitudes de onda.

La amplitud de las oscilaciones del medio en un punto dado será mínima si la diferencia de marcha de dos ondas, que excitan dichas oscilaciones en este punto, es igual a un número impar de semilongitudes de onda:

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (4.4)$$

¹⁾ Esto sólo es correcto si las fases de las oscilaciones de los dos focos coinciden.

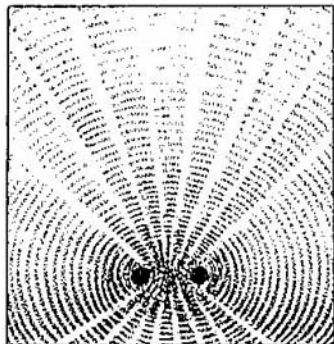


Fig. 83

Si la diferencia de marcha $d_2 - d_1$ toma un valor intermedio entre λ y $\lambda/2$, la amplitud de la oscilación resultante tomará también cierto valor intermedio entre el doble de la amplitud y cero. Pero lo más importante es que la amplitud de las oscilaciones en un punto cualquiera no varía con el tiempo. En la superficie del agua aparece una distribución determinada, invariable con el tiempo, de la amplitud de las oscilaciones, llamada *figura de interferencia* (fig. 83).

ONDAS COHERENTES. Para que se forme una figura de interferencia estable es necesario que los focos de las ondas tengan igual frecuencia y que las fases de sus oscilaciones coincidan o difieran en cierta magnitud constante (independiente del tiempo). En otras palabras, la **DIFERENCIA DE FASE** de las oscilaciones de ambos focos debe permanecer **INVARIABLE**. Los focos o fuentes que satisfacen estas condiciones se dice que son *coherentes*. Se da también el nombre de coherentes a las ondas creadas por ellos. Sólo cuando se componen ondas coherentes se origina una figura de interferencia estable.

En cambio, si la diferencia de fase de las oscilaciones de los focos no permanece constante, en un punto cualquiera del medio variará la diferencia de fase de las oscilaciones excitadas por las dos ondas. Por eso la amplitud de las oscilaciones resultantes variará en el transcurso del tiempo. Como resultado los máximos y los mínimos se trasladarán en el espacio y la figura de interferencia perderá nitidez.

La interferencia es un fenómeno propio de los procesos ondulatorios, cualquiera que sea su naturaleza. En particular, se puede observar la interferencia del sonido. La gran importancia de la interferencia consiste en que si al estudiar un proceso se pone de manifiesto la interferencia, esto sirve de demostración indiscutible de que se trata de un movimiento ondulatorio.

DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA DURANTE LA INTERFERENCIA. Las ondas transportan energía. ¿Qué ocurre con esta energía cuando las ondas se atenúan una a otra? ¿No será que se convierte en otra forma de la energía y que en los mínimos de la figura de interferencia se desprende calor? Nada de eso. La existencia del mínimo en un punto dado de la figura de interferencia significa que a dicho punto no llega energía alguna. A causa de

la interferencia se produce una redistribución de la energía en el espacio. La energía no se distribuye uniformemente por todas las partículas del medio, sino que se concentra en los máximos a costa de que a los mínimos no llega en absoluto.

4.10. Principio de Huygens. Ley de la reflexión de las ondas

Hasta ahora hemos dado a conocer las ondas que se propagan en un medio homogéneo. Ahora vamos a estudiar lo que ocurre con las ondas cuando se encuentran con un obstáculo, por ejemplo, con una pared sólida.

El principio general que describe el comportamiento de las ondas fue propuesto por el científico holandés, contemporáneo de Newton, Christian HUYGENS. Según el principio de Huygens todo punto de un medio hasta el cual llega una perturbación se comporta como un foco de ondas secundarias. Para, conociendo la posición de la superficie de onda en un instante dado t , hallar su posición en el instante siguiente $t + \Delta t$ hay que considerar cada punto de la superficie de onda como una fuente de ondas secundarias. La superficie tangente a todas las ondas secundarias es la superficie de onda en el instante siguiente (fig. 84). Este principio es válido en igual medida para describir la propagación de cualesquiera ondas, sean sonoras, luminosas o de otro tipo.

Para las ondas mecánicas el principio de Huygens tiene una interpretación intuitiva: las partículas del medio, hasta las cuales llega una oscilación, oscilando a su vez, ponen en movimiento las partículas vecinas del medio con las cuales interaccionan.

Aplicando el principio de Huygens podemos hallar la ley a la cual se subordinan las ondas al reflejarse en la superficie de separación de dos medios.

Vamos cómo se refleja una onda plana. En la fig. 85 MN es la superficie reflectora y las rectas A_1A y B_1B , dos rayos de la onda plana incidente (paralelos entre sí). El plano AC es la superficie de dicha onda.

El ángulo α entre el rayo incidente y la perpendicular a la superficie reflectora en el punto de incidencia se llama *ángulo de incidencia*.

La superficie de onda reflejada se puede obtener trazando la envolvente de las ondas secundarias, cuyos centros se encuentran en el límite de separación de los medios. Al límite reflector distintas partes de la superficie de onda AC llegan

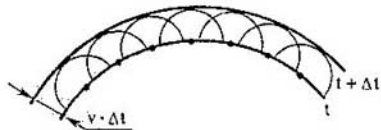


Fig. 84

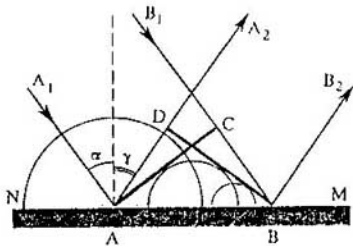


Fig. 85



Christian Huygens (1629-1695), eminente físico y matemático holandés, creador de la primera teoría ondulatoria de la luz. Los fundamentos de esta teoría los expuso en su "Tratado de la luz". Fue el primero en utilizar el péndulo para conseguir la marcha regular de los relojes y dedujo la fórmula del período de las oscilaciones de los péndulos simple y compuesto. Sus trabajos matemáticos conciernen a la investigación de las secciones cónicas, de la cicloide y de otras curvas. A él se debe uno de los primeros trabajos sobre teoría de las probabilidades (tratado "Sobre los cálculos en el juego de dados"). Con un telescopio perfeccionado por él, descubrió el satélite Titán de Saturno y determinó que el anillo de Saturno no toca la superficie del planeta.

no al mismo tiempo. Por consiguiente, la excitación de las oscilaciones en el punto A empieza cierto tiempo $\tau = |CB|/v$ antes que en el punto B (siendo v la velocidad de onda).

En el instante en que la onda llega al punto B y en este punto comienza la excitación de oscilaciones, la onda secundaria con centro en el punto A será ya un hemisferio de radio $R = |AD| = \tau v = |CB|$. Los radios de las ondas secundarias de los focos que se encuentran entre los puntos A y B varían como muestra la fig. 85. La envolvente de las ondas secundarias es el plano DB , tangente a las superficies esféricas. Este plano es la superficie de onda reflejada. Los rayos reflejados AA_2 y BB_2 son perpendiculares a la superficie de onda DB . El ángulo γ entre la perpendicular a la superficie reflectora y el rayo reflejado se llama *ángulo de reflexión*.

Como $|AD| = |CB|$ y los triángulos ADB y ACB son rectángulos, $\widehat{DBA} = \widehat{CAB}$. Pero $\alpha = \widehat{CAB}$ y $\gamma = \widehat{DBA}$, por ser ángulos cuyos lados son perpendiculares. Por consiguiente, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia¹⁾:

$$\alpha = \gamma. \quad (4.5)$$

Además, como se deduce de la construcción de Huygens, el rayo incidente, el reflejado y la perpendicular levantada en el punto de incidencia, se encuentran en un plano. En esto consiste la *ley de la reflexión de las ondas*²⁾.

¹⁾ Aquí y en adelante, en las relaciones algebraicas se entiende por *ángulo* su valor medido en radianes (o en grados).

²⁾ En el límite de separación de dos medios la onda no sólo se refleja, sino que parcialmente penetra en el segundo medio, cambiando la dirección en que se propaga (es decir, refractándose). Este fenómeno no vamos a estudiarlo aquí.

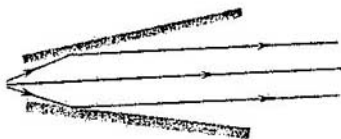


Fig. 86

La reflexión del sonido en las paredes sólidas se utiliza en los portavoces, dispositivos simples que sirven para crear una onda sonora dirigida. El principio en que se basa el funcionamiento del portavoz se ve claramente en la fig. 86. En virtud de la reflexión del sonido en la superficie interna del aparato, desde la fuente de sonido se propaga, siguiendo el eje del portavoz, una onda más potente que cuando la fuente está desprovista de tal utensilio.

La reflexión del sonido en las paredes, en el suelo y en el techo influye mucho en la audibilidad del sonido en los locales. El sonido reflejado se mezcla con el emitido inicialmente y en las grandes salas lo deforma. Por eso las palabras pueden hacerse poco inteligibles. El tapizado de los sillones y las cortinas disminuyen la intensidad de las ondas reflejadas y con esto influyen notablemente en la calidad del sonido. Esto se tiene en cuenta cuando se diseñan salas de espectáculos. Existe una asignatura técnica especial denominada *acústica arquitectónica*.

4.11. Difracción de las ondas

Al estudiar en el § 4.10 la reflexión de las ondas hemos supuesto implícitamente que la superficie reflectora era muy grande. Pero es muy frecuente que la onda encuentre a su paso un obstáculo pequeño (en comparación con la longitud de onda). La relación entre la longitud de onda y el tamaño del obstáculo determina en lo fundamental el comportamiento de la onda.

Las ondas son capaces de contornear el borde de los obstáculos. Cuando las dimensiones del obstáculo son pequeñas, las ondas, rodeando el borde de éste, se cierran detrás de él. Así, las olas del mar rodean libremente una roca que sobresale del agua si sus dimensiones son menores que la longitud de la onda o comparables con ella. Detrás de la roca las olas se propagan como si ésta no existiera (rocas pequeñas en la fig. 87). Exactamente lo mismo la



Fig. 87

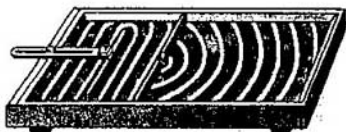


Fig. 88



Fig. 89

onda originada por una piedrecita lanzada a un estanque rodea a una varilla que emerge del agua. Únicamente cuando el tamaño del obstáculo es grande, comparado con la longitud de onda (roca grande en la fig. 87), detrás de éste se producirá una sombra: las ondas no penetran detrás de él.

Las ondas sonoras también son capaces de rodear los obstáculos. La señal emitida por un automóvil se puede oír detrás de la esquina de una casa cuando aquél aún no se ve. En un bosque los árboles impiden que las personas se vean. Para no perderse, éstas se llaman de vez en cuando. Las ondas sonoras, a diferencia de las de la luz, rodean libremente los troncos de los árboles y conducen la voz hasta la persona invisible.

La desviación de las ondas de su propagación rectilínea y el rodeo por ellas de los obstáculos recibe el nombre de difracción (del latín *diffractus*, roto, quebrado). La difracción es propia de todo proceso ondulatorio en la misma medida que la interferencia. Durante la difracción tiene lugar una deformación de las superficies de onda en los bordes de los obstáculos.

La difracción de las ondas se manifiesta claramente en los casos en que las dimensiones del obstáculo que encuentran a su paso las ondas es menor que la longitud de onda o comparable con ella.

El fenómeno de la difracción de las ondas se puede observar muy bien en la superficie del agua, si en el camino que aquéllas recorren se interpone una pantalla con una rendija, cuya anchura sea menor que la longitud de la onda (fig. 88). Se ve claramente que más allá de la pantalla se propaga una onda circular, como si en la rendija hubiera un cuerpo oscilante, es decir, un foco de ondas. De acuerdo con el principio de Huygens, precisamente esto es lo que debería tener lugar. Los focos secundarios que aparecen en la estrecha rendija están tan próximos uno de otro que pueden considerarse como una fuente puntual.

Si la anchura de la rendija es grande, comparada con la longitud de onda, el aspecto de la propagación de las ondas más allá de la pantalla es otro completamente distinto (fig. 89). La onda pasa por la rendija sin que su forma varíe apenas. Sólo en los bordes puede notarse una pequeña deformación de la superficie de onda, en virtud de la cual la onda penetra parcialmente en el espacio que hay detrás de la pantalla.

El principio de Huygens da la posibilidad de comprender por qué se produce la difracción. Las ondas secundarias que emiten las partes del medio penetran detrás de los bordes del obstáculo, que se encuentra en el camino de propagación de la onda. No obstante, partiendo del enunciado del principio de Huygens dado anteriormente, sería imposible explicar la difracción en todos sus detalles. Este principio requería ser precisado como lo hizo el científico francés Augustin FRESNEL a principios del siglo XIX.

Según Fresnel, la superficie de onda en todo instante no es la simple envolvente de las ondas secundarias, sino el resultado de la interferencia de éstas (principio de Huygens-Fresnel).

¿ ?

1. ¿Qué ondas se llaman coherentes?
2. ¿A qué se llama interferencia?
3. Enuncie las condiciones de los máximos y de los mínimos de una figura de interferencia.
4. ¿La anulación recíproca de las ondas en un mínimo de interferencia, significa que la energía de las ondas se convierte en otras formas de energía?
5. ¿Cómo se enuncia el principio de Huygens?
6. ¿En qué condiciones la difracción de las ondas se manifiesta con mayor nitidez?

Ejercicio

4

1. El eco de un disparo de fusil llega al tirador al cabo de 4 s de haber disparado. ¿A qué distancia s de éste se encuentra el obstáculo en el cual se ha reflejado el sonido? La velocidad del sonido en el aire tómese igual a 330 m/s.
2. A la distancia $s = 1060$ m del observador se da un martillazo a un raíl. El observador, aplicando un oído a dicho raíl, oye el sonido con una antelación $\tau = 3$ s respecto del tiempo que tarda en llegar por el aire. ¿A qué es igual la velocidad v_1 del sonido en el acero? Como velocidad del sonido en el aire tómese $v = 330$ m/s.
3. Determinar la velocidad del sonido en el agua si las oscilaciones con período $T = 0,005$ s generan una onda sonora de longitud $\lambda = 7,175$ m.
4. Hallar la diferencia de fase entre dos puntos de una onda, si la diferencia de sus distancias al foco es de 25 cm y la frecuencia de las oscilaciones $\nu = 680$ Hz. Tomar la velocidad del sonido v igual a 340 m/s.
5. ¿En cuántas veces varía la longitud de una onda sonora al pasar el sonido del aire al agua? La velocidad del sonido en el agua es de 1435 m/s, y en el aire, de 340 m/s.

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 4

Se llama onda la propagación de las oscilaciones en el espacio con el correr del tiempo. La onda transporta energía, pero no transporta la sustancia del medio.

Existen ondas transversales y ondas longitudinales. En la onda transversal las oscilaciones se efectúan perpendicularmente a la dirección de propagación, y en la longitudinal, a lo largo de esta dirección.

La distancia entre los puntos de una onda más próximos entre sí, que oscilan en la misma fase, se llama longitud de onda.

Todas las ondas se propagan con velocidad finita. La longitud de onda λ depende de la velocidad v de propagación de la onda y de la frecuencia ν de las oscilaciones:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

Las ondas longitudinales, que con la frecuencia de 17 a 20000 Hz se propagan en un medio, reciben el nombre de ondas sonoras o acústicas. La velocidad de las ondas sonoras depende de las propiedades del medio y de la temperatura.

La intensidad del sonido está determinada por la amplitud de las oscilaciones, y la altura, por la frecuencia de éstas.

Tienen muchas aplicaciones las ondas ultrasonoras, cuya frecuencia de oscilación es de más de 20000 Hz. Estas ondas dan la posibilidad de crear estrechos haces dirigidos.

Cuando varias ondas se superponen unas a otras, las oscilaciones producidas por ellas se suman. La composición en el espacio, con la cual se origina una distribución constante con el tiempo de la amplitud de las oscilaciones resultantes, se denomina interferencia. Si la diferencia de marcha de dos ondas es igual a un número entero de longitudes de onda, las ondas se refuerzan una a otra. Si la diferencia de marcha es igual a un número impar de semilongitudes de onda, las ondas se atenúan.

Una figura de interferencia estable sólo se observa cuando las ondas que se componen son coherentes. Las ondas coherentes tienen la misma frecuencia y una diferencia de fase que no varía con el tiempo.

Las ondas son capaces de rodear un obstáculo. La desviación de las ondas de su propagación rectilínea y el rodeo por ellas de los obstáculos recibe el nombre de difracción. La difracción de las ondas se manifiesta claramente en los casos en que las dimensiones de los obstáculos son menores que la longitud de onda o comparables con ella.

Huygens enunció el principio general que describe el comportamiento de las ondas. Según el principio de Huygens todo punto de un medio hasta el cual llega una perturbación se convierte en manantial de ondas secundarias.

5.1. Relación entre el campo eléctrico alterno y el campo magnético alterno

Al estudiar las oscilaciones eléctricas nos valimos de las leyes de la electrodinámica, conocidas por el curso anterior de física. Pero estos conocimientos son insuficientes para comprender el mecanismo de la formación y propagación de las ondas electromagnéticas. Por esta razón, después de repasar los postulados fundamentales de la electrodinámica estudiados en dicho curso daremos a conocer nuevos hechos.

POSTULADOS FUNDAMENTALES DE LA ELECTRODINÁMICA.

Vamos a repasar brevemente los postulados fundamentales de la electrodinámica a que nos hemos venido refiriendo hasta ahora.

Las partículas cargadas eléctricamente, tanto en reposo como en movimiento, crean a su alrededor un campo eléctrico. Las líneas de intensidad de este campo empiezan en las cargas positivas y terminan en las negativas. El campo eléctrico actúa sobre las partículas cargadas con independencia de que estén en reposo o en movimiento.

La corriente eléctrica (conjunto de partículas cargadas en movimiento) crea a su alrededor un campo magnético. Las líneas de inducción magnética rodean a los conductores con corriente y siempre son cerradas. Estos campos se llaman rotacionales. El campo magnético actúa sobre la corriente eléctrica, es decir, únicamente sobre las partículas cargadas que se mueven. La corriente eléctrica continua crea un campo magnético cuya inducción no varía con el tiempo.

Sólo al tratar de la inducción electromagnética pasamos a estudiar los campos variables con el tiempo. Aquí se puso de manifiesto un hecho fundamental nuevo: el campo magnético alternativo genera un campo eléctrico cuya líneas de intensidad son cerradas. Así, pues, el campo eléctrico puede ser creado no sólo por las cargas eléctricas, sino también por un campo magnético variable.

Cuando la inducción magnética \vec{B} varía con el tiempo se produce un campo eléctrico, cuyas líneas de intensidad envuelven a las líneas de inducción magnética (fig. 90, a). Cuanto más rápidamente cambia la inducción magnética, tanto mayor es la intensidad del campo eléctrico.

De acuerdo con la ley de Lenz, cuando la inducción magnética crece ($\Delta B/\Delta t > 0$), el sentido de la intensidad \vec{E} del campo eléctrico forma un "TORNILLO LEVÓGIRO" con el sentido del vector \vec{B} . Esto significa que si un tornillo roscado a izquierdas se hace girar en el sentido de la intensidad del campo eléctrico, el movimiento de avance del tornillo coincidirá con el sentido de la inducción magnética.

APARICIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO CUANDO VARÍA EL CAMPO MAGNÉTICO. J. C. Maxwell, cuando estudiaba las propiedades del

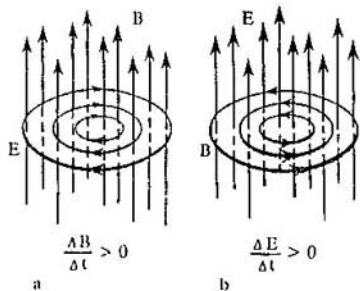


Fig. 90

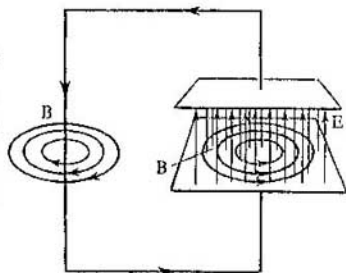


Fig. 91

campo electromagnético, se planteó la pregunta: ¿si el campo magnético variable crea un campo eléctrico, no existirá en la naturaleza el proceso inverso? ¿No creará a su vez el campo eléctrico variable un campo magnético? Este razonamiento, dictado por la seguridad en la unidad de la naturaleza, en la armonía interna de las leyes de la naturaleza, constituye la base de la hipótesis de Maxwell.

Maxwell admitió que este tipo de proceso existe realmente en la naturaleza. En todos los casos, en que un campo eléctrico varía con el tiempo, este campo genera otro magnético. Las líneas de inducción magnética de dicho campo magnético envuelven a las líneas de intensidad del campo eléctrico (fig. 90, b), de un modo semejante a como las líneas de intensidad de un campo eléctrico abrazan a las líneas de inducción del campo magnético variable. Pero ahora cuando crece la intensidad del campo eléctrico ($\Delta E/\Delta t > 0$) el sentido del vector inducción \vec{B} del campo magnético que se produce forma un "TORNILLO DEXTRÓGIRO" con el sentido del vector \vec{E} .

Según la hipótesis de Maxwell, el campo magnético que se crea, por ejemplo, al cargar un condensador, se debe no sólo a la corriente que pasa por el conductor, sino también al campo eléctrico variable que existe en el espacio entre las armaduras del condensador (fig. 91). Además, el campo eléctrico variable crea un campo magnético igual al que se produciría entre las armaduras del condensador si existiera una corriente eléctrica igual a la que pasa por el conductor. El acierto de la hipótesis de Maxwell quedó demostrado experimentalmente cuando se descubrieron las ondas electromagnéticas. Estas ondas existen únicamente porque el campo magnético alternativo crea un campo eléctrico, también alterno, que, a su vez, genera un campo magnético y así sucesivamente.

5.2. Campo electromagnético

Una vez descubierta la interacción entre los campos eléctrico y magnético variables quedó claro que estos campos no existen separados, independientes uno de otro.

Es imposible crear un campo magnético alternativo sin que al mismo

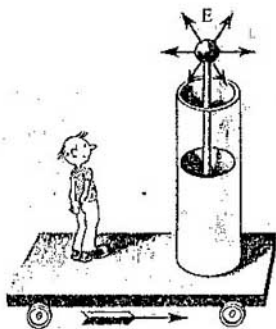


Fig. 92

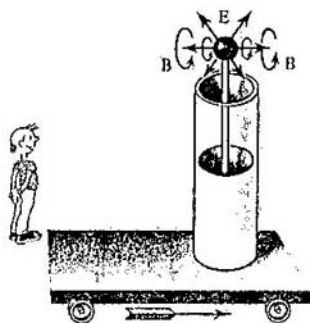


Fig. 93

tiempo se produzca en el espacio un campo eléctrico. Y viceversa, un campo eléctrico alterno no puede existir sin campo magnético.

No es menos importante el que un campo eléctrico sin magnético o un campo magnético sin eléctrico sólo puedan existir con respecto a un determinado sistema de referencia. Así, una carga en reposo solamente crea un campo eléctrico (fig. 92). Pero dicha carga sólo está en reposo con respecto a un determinado sistema de referencia. Con respecto a otros sistemas de referencia estará en movimiento y, por consiguiente, creará un campo magnético (fig. 93).

Exactamente lo mismo, en el sistema de referencia asociado a un imán sólo se manifiesta el campo magnético. Pero un observador en movimiento respecto del imán descubrirá también el campo eléctrico. El hecho es que en el sistema de referencia en movimiento respecto del imán, el campo magnético varía con el tiempo a medida que el observador se acerca a éste y a medida que se aleja de él. Pero un campo magnético variable con el tiempo genera un campo eléctrico rotacional (fenómeno de la inducción electromagnética).

Por lo tanto, carece de sentido afirmar que en un punto dado del espacio existe solamente un campo eléctrico o solamente un campo magnético, si no se indica respecto de qué sistema de referencia se consideran estos campos. La ausencia del campo eléctrico en el sistema en que el imán está en reposo no significa, ni mucho menos, que el campo eléctrico no existe en absoluto. Respecto de un sistema de referencia cualquiera que se mueva con relación al imán, el campo eléctrico puede ser descubierto.

Los campos eléctrico y magnético son manifestaciones de un todo único, el *campo electromagnético*. El campo electromagnético es una forma particular de la materia. Este campo existe en realidad, es decir, independientemente de nosotros y de nuestros conocimientos acerca de él.

En dependencia de en qué sistema de referencia se consideran los procesos electromagnéticos, se ponen de manifiesto unos u otros aspectos del todo único, es decir, del campo electromagnético. Todos los sistemas inerciales de referencia son equivalentes. Por esta razón no puede darse preferencia a ninguna de las manifestaciones del campo electromagnético.

5.3.

Cómo se transmiten las interacciones electromagnéticas

Las leyes fundamentales de la naturaleza, entre las cuales se encuentran las del electromagnetismo descubiertas por Maxwell, son admirables en el sentido siguiente: estas leyes pueden dar MUCHO más de lo que se encierra en los hechos que sirvieron de base para su obtención. Si cada ley respondiera únicamente a los hechos de los cuales se dedujo, habría tantas leyes como fenómenos existen en la naturaleza. En vez de una ciencia moderna tendríamos una inmensa acumulación de datos acerca de los procesos que se observan en la naturaleza, pero no podríamos predecir nada.

Entre las consecuencias innumerables, interesantísimas e importantes, que se deducen de las leyes del campo magnético formuladas por Maxwell, hay una que merece especial atención. Es ésta la consecuencia de que la interacción electromagnética se propaga con velocidad finita.

De acuerdo con la teoría de la acción a distancia, la fuerza de Coulomb que actúa sobre una carga eléctrica cambia inmediatamente, si la carga vecina se desplaza de su sitio. La acción se transmite instantáneamente. Desde el punto de vista de la acción a distancia no puede ocurrir de otra forma: puesto que una carga "siente" directamente a través del vacío la presencia de la otra.

Pero, según la teoría de la acción próxima, la cuestión se plantea de un modo completamente distinto y más complejo. La traslación de la carga hace que varíe el campo eléctrico junto a ella. Este campo eléctrico variable genera un campo magnético también variable en las zonas contiguas del espacio. El campo magnético variable crea, a su vez, un campo eléctrico variable y así sucesivamente.

Este proceso se representa esquemáticamente en la fig. 94. El campo magnético alternativo, cuyas líneas de inducción son B , engendra los torbellinos del campo eléctrico, cuyas líneas de intensidad son E . Este campo eléctrico crea el campo magnético de líneas de inducción B_1 y así sucesivamente.

El desplazamiento de una carga produce, de este modo, una "salpicadura" del campo electromagnético que, propagándose, abarca cada vez más zonas del espacio circundante, reconstruyendo por el camino el campo que existía antes de que la carga se desplazase. Finalmente, la "salpicadura" alcanza a una segunda carga, lo que hace que varíe la fuerza que actúa sobre ella. Pero esto ocurre no en el instante en que se produjo el desplazamiento de la primera carga. El proceso de propagación de la perturbación electromagnética, cuyo mecanismo descubrió Maxwell, transcurre a velocidad finita, aunque ésta es muy grande.

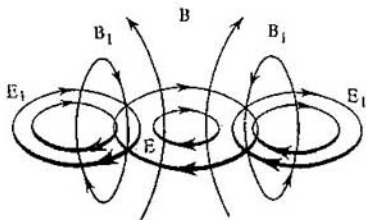


Fig. 94

En esto consiste la propiedad fundamental del campo, que elimina todas las dudas acerca de su realidad.

Maxwell demostró matemáticamente que la velocidad de propagación de este proceso es igual a la velocidad de la luz en el vacío.

5.4. Onda electromagnética

Imagínese que una carga eléctrica no ha sido simplemente desplazada de un punto a otro, sino que se ha hecho oscilar a lo largo de cierta recta. La carga se mueve de un modo semejante a como lo hace un cuerpo suspendido por un muelle, pero sus oscilaciones se efectúan con una frecuencia mucho mayor. El campo eléctrico en la proximidad inmediata a la carga empieza a variar periódicamente. El período de estas variaciones será, evidentemente, igual al período de las oscilaciones de la carga. El campo eléctrico alternativo generará un campo magnético variable periódicamente y éste, a su vez, hará que aparezca otro campo eléctrico alternativo, pero ya a mayor distancia de la carga, y así sucesivamente.

No vamos a analizar en detalles el complejo proceso de formación del campo electromagnético que origina una carga oscilante. Daremos a conocer únicamente el resultado final.

En el espacio que rodea a la carga, abarcando cada vez más regiones, se produce un sistema de campos eléctricos y magnéticos, perpendiculares entre sí, que varían periódicamente. En la fig. 95 se muestra la "fotografía instantánea" de este sistema de campos.

Se forma la llamada *onda electromagnética*, que avanza en todas las direcciones a partir de la carga oscilante. En cada punto del espacio los campos eléctricos y magnéticos se intercambian periódicamente con el tiempo. Cuanto más lejos de la carga se encuentre el punto, tanto más tarde llegarán a él las oscilaciones de los campos. Por consiguiente, a distintas distancias de la carga las oscilaciones se producen en fases diferentes.

Las oscilaciones de los vectores \vec{E} y \vec{B} en un punto cualquiera coinciden en fase. La distancia entre dos puntos inmediatos en los cuales las oscilaciones se cumplen en fases iguales es la longitud de onda λ . En un instante dado los valores de los vectores \vec{E} y \vec{B} varían periódicamente en el espacio con un período λ .

Las direcciones de los vectores oscilantes intensidad del campo eléctrico e inducción magnética del campo son perpendiculares a la dirección en que se propaga la onda. La onda electromagnética es transversal.

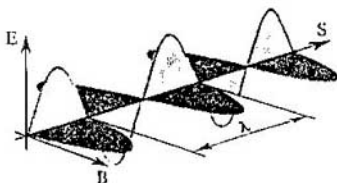


Fig. 95



Heinrich Hertz (1857-1894), eminente físico alemán. En 1886 demostró experimentalmente, por vez primera, la existencia de las ondas electromagnéticas. Estudiando estas ondas estableció que las propiedades principales de las ondas electromagnéticas eran idénticas a las de las ondas luminosas. Sus trabajos sirvieron de demostración experimental de que la teoría del campo electromagnético y, en particular, la teoría electromagnética de la luz, era justa. Las ecuaciones de Maxwell en su forma actual fueron escritas por Hertz.

En 1886 Hertz observó por primera vez el efecto fotoeléctrico. En su libro "Principios de mecánica" (1894) dio una nueva formulación a las leyes de la mecánica clásica, en la cual no se utiliza el concepto de fuerza.

Así, pues, en la onda electromagnética los vectores \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares entre sí y a la dirección en que se propaga la onda. Si un sacacorchos de hélice a derechas se hace girar en el sentido que va del vector \vec{E} al vector \vec{B} , su movimiento de avance coincidirá con el sentido del vector velocidad \vec{c} de la onda.

Las ondas electromagnéticas son emitidas por cargas oscilantes. Es esencial el hecho de que la velocidad del movimiento de estas cargas varíe con el tiempo, es decir, que se muevan **CON ACCELERACIÓN**. La existencia de la aceleración es la condición principal para la radiación de las ondas electromagnéticas. El campo electromagnético es emitido apreciablemente no sólo cuando una carga oscila, sino también cuando la velocidad de ésta varía rápidamente, además la intensidad de la onda emitida es tanto mayor cuanto mayor es la aceleración con que se mueve la carga.

Intuitivamente podemos imaginarnos esto como sigue. Cuando la partícula cargada se mueve con velocidad constante, los campos eléctrico y magnético que ella crea la siguen como si fueran una cola ondulante. Pero cuando la partícula se acelera se pone de manifiesto la inercia que le es inherente al campo electromagnético. El campo se "desprende" de la partícula y empieza a existir independientemente en forma de ondas electromagnéticas.

La energía del campo electromagnético de la onda en un instante dado varía periódicamente en el espacio al variar los vectores \vec{E} y \vec{B} . La onda progresiva lleva consigo una energía que se traslada con la velocidad c a lo largo de la dirección en que se propaga la onda. En virtud de esto, la energía de la onda electromagnética en una región cualquiera del espacio varía periódicamente con el tiempo.

Maxwell estaba completamente convencido de que las ondas electromagnéticas eran reales, pero no llegó a vivir hasta su descubrimiento experimental. Diez años después de su muerte las ondas electromagnéticas eran descubiertas experimentalmente por H. R. Hertz.

5.5. Emisión de las ondas electromagnéticas

La onda electromagnética se forma en virtud de la relación mutua entre los campos eléctrico y magnético variables. La variación de un campo hace que aparezca el otro. En el § 5.1 se dijo que cuanto más rápida es la variación con el tiempo de la inducción magnética, tanto mayor es la intensidad del campo eléctrico que surge. Y, a su vez, cuanto más rápidamente varía la intensidad del campo eléctrico, tanto mayor es la inducción magnética.

Por consiguiente, para que se formen ondas electromagnéticas de gran intensidad es necesario crear oscilaciones electromagnéticas de frecuencia suficientemente alta. Precisamente con esta condición la intensidad E del campo eléctrico y la inducción B del campo magnético varían con rapidez.

Las oscilaciones de alta frecuencia (mucho mayor que la de la corriente industrial de 50 Hz) se pueden obtener con un circuito oscilante. La frecuencia de las oscilaciones

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

será tanto mayor cuanto menores sean la inductancia y la capacidad del circuito.

CIRCUITO OSCILANTE CERRADO. No obstante, una frecuencia grande de las oscilaciones electromagnéticas no garantiza aún la emisión intensa de ondas electromagnéticas. Un circuito oscilante ordinario, como el representado en la fig. 24 (que se puede llamar cerrado), es un sistema eléctrico casi cerrado. En este circuito la intensidad de la corriente en un instante dado es igual en todas las partes del circuito. Un circuito así emite muy débilmente ondas electromagnéticas.

A cada parte de una espira de la bobina del circuito le corresponde otra parte, situada a poca distancia de ella, en el extremo opuesto del diámetro de la espira, por la cual pasa la corriente en sentido contrario (fig. 96). A gran distancia de la espira estas dos partes crean campos magnéticos cuyas inducciones son casi iguales en módulo y están dirigidas en sentidos opuestos. Como resultado, lejos del circuito oscilante los campos se atenúan uno a otro, de tal modo que el campo magnético resulta estar concentrado únicamente dentro de la bobina.

Así mismo se plantea el problema con los campos eléctricos de las cargas que hay en las armaduras del condensador. Estas cargas son iguales en módulo y tienen signos opuestos. Casi todo el campo eléctrico está concentrado entre las placas y, lejos de ellas, los campos de las cargas de signos contrarios casi se compensan totalmente uno a otro.

CIRCUITO OSCILANTE ABIERTO. Para obtener las ondas electromagnéticas utilizó Hertz un dispositivo simple que hoy se conoce con el de *oscilador o vibrador de Hertz*. Este dispositivo no es más que un *circuito oscilante abierto*.

Al circuito oscilante abierto se puede llegar partiendo del cerrado si paulatinamente se van separando las placas del condensador (fig. 97), dismi-

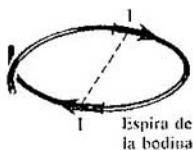


Fig. 96

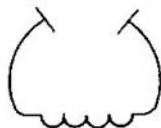
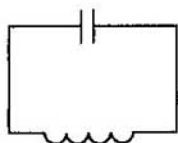


Fig. 97

nuyendo su área y reduciendo a la vez el número de espiras de la bobina. En definitiva se obtiene simplemente un conductor recto. Esto es un circuito oscilante abierto. La capacidad y la inductancia del oscilador de Hertz son pequeñas. Por eso la frecuencia de las oscilaciones es bastante grande.

En el circuito oscilante abierto las cargas no están concentradas en los extremos, sino que están distribuidas por todo el conductor. La corriente, en un instante dado, está dirigida en el mismo sentido en todas las secciones del conductor, pero su intensidad no es la misma en todas ellas. En los extremos la intensidad es nula y en el centro alcanza el máximo. (Se recordará que en los circuitos de corriente alterna ordinarios la intensidad de la corriente en un instante dado es igual en todas las secciones.)

Para excitar las oscilaciones en el circuito abierto, en los tiempos de Hertz procedían como sigue. Cortaban el conductor por la mitad de tal modo que quedase un pequeño espacio de aire, llamado espacio de chispa (fig. 98). Ambas partes del conductor se cargaban hasta que la diferencia de potencial era grande. Cuando esta diferencia superaba cierto valor límite, saltaba la chispa (fig. 99), el circuito se cerraba y en el oscilador se producían oscilaciones.

Los campos eléctricos y magnéticos que crean las distintas partes del oscilador a grandes distancias de éste ya no se compensan entre sí.

Las oscilaciones en el circuito oscilante serán amortiguadas por dos causas: PRIMERA, por la existencia en él de resistencia óhmica, y SEGUNDA, debido a que el oscilador emite ondas electromagnéticas y gasta energía en esto. Una vez que las oscilaciones cesan, ambos conductores vuelven a irse cargando de la

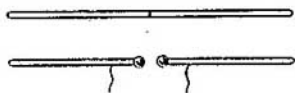


Fig. 98

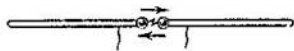


Fig. 99

fuerza hasta que se produce la ruptura del espacio de chispa y todo se repite de nuevo.

En la actualidad para obtener oscilaciones no amortiguadas en el circuito oscilante abierto, éste se acopla por inducción al circuito oscilante de un generador de lámpara.

DEPENDENCIA DE LA ENERGÍA DE LAS ONDAS EMITIDAS RESPECTO DE LA FRECUENCIA DE LAS OSCILACIONES. La energía electromagnética que emite un oscilador en la unidad de tiempo depende mucho de la frecuencia de las oscilaciones de la corriente eléctrica. Esta dependencia se puede establecer partiendo de los razonamientos que siguen. La energía del campo eléctrico es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo (véase el libro "Física 3" (Ed. MIR). Puede mostrarse que la energía del campo magnético es proporcional al cuadrado de la inducción magnética. La energía total de la onda es igual a la suma de las energías de los campos eléctrico y magnético. Pero las amplitudes de las oscilaciones tanto de la intensidad del campo eléctrico como de la inducción magnética en la onda electromagnética son proporcionales a la aceleración de las partículas cargadas emisoras de las ondas electromagnéticas. Por eso la energía radiada es proporcional al cuadrado de la amplitud de la aceleración.

La amplitud de la aceleración de las partículas en movimiento oscilatorio armónico es proporcional, a su vez, al cuadrado de la frecuencia (véase el § 1.8). Por consiguiente, la energía emitida o radiada en la unidad de tiempo es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia.

Si la frecuencia de las oscilaciones aumenta solamente dos veces, ¡la energía radiada se multiplica por 16! En las antenas de las estaciones emisoras de radio se excitan oscilaciones con frecuencias desde decenas de millares hasta decenas de millones de hertzios. La radiación de las corrientes alternas industriales, con frecuencia de 50 Hz, prácticamente no se nota.

EXPERIMENTOS DE HERTZ. Hertz obtuvo las ondas electromagnéticas excitando en el oscilador, por medio de una fuente de alta tensión, una serie de impulsos de corriente rápidamente variable. Las oscilaciones de las cargas eléctricas en el oscilador crean una onda electromagnética. Pero las oscilaciones en el oscilador no las realiza una sola partícula cargada, sino un número enorme de electrones que se mueven acordadamente. En la onda electromagnética los vectores \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares entre sí, encontrándose el vector \vec{E} en el plano que pasa por el oscilador y siendo el vector \vec{B} perpendicular a dicho plano. En la fig. 100 se muestran las líneas de los campos eléctrico y magnético alrededor del oscilador en un instante fijado. En el plano horizontal se encuentran las líneas de inducción del campo magnético, y en el vertical, las líneas de intensidad del campo eléctrico. La emisión de ondas tiene su intensidad máxima en la dirección perpendicular al eje del oscilador¹⁾. A lo largo del eje no se produce radiación.

Hertz registraba las ondas electromagnéticas por medio de un oscilador receptor, consistente en un dispositivo igual que el oscilador emisor. Bajo la acción del campo eléctrico alternativo de la onda electromagnética, en el

¹⁾ Compare las representaciones gráficas de la onda electromagnética en las figs. 95 y 100.

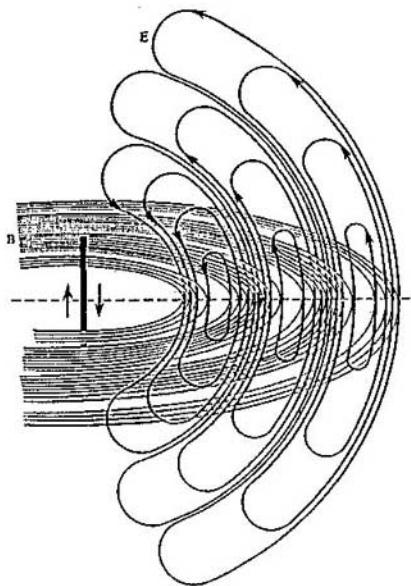


Fig. 100

oscilador receptor se excitaban oscilaciones de la corriente. Si la frecuencia propia del oscilador receptor coincide con la frecuencia de las ondas electromagnéticas se observa la resonancia. Las oscilaciones en el oscilador receptor se efectúan con gran amplitud. Hertz las descubrió observando las chispas en el pequeñísimo espacio entre los conductores del oscilador receptor.

Hertz no sólo observó las ondas electromagnéticas, sino que también descubrió que éstas se comportan de un modo semejante a otros tipos de ondas. En particular, observó la reflexión de las ondas electromagnéticas en una chapa metálica y la interferencia de las mismas. Al componerse la onda procedente del oscilador con la onda reflejada en la chapa metálica se forman los máximos y mínimos de una figura de interferencia (véase el § 4.9). Desplazando el oscilador receptor se puede hallar la posición de los máximos y determinar la longitud de onda.

VELOCIDAD DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. En los experimentos de Hertz la longitud de onda era de varias decenas de centímetros. Calculando la frecuencia propia de las oscilaciones electromagnéticas del oscilador, Hertz pudo hallar la velocidad de la onda electromagnética por la fórmula $v = \lambda \nu$. Esta velocidad resultó ser igual a la velocidad de la luz: $c = 300\,000$ km/s.

Los experimentos de Hertz confirmaron brillantemente las predicciones teóricas de Maxwell.

¿ ?

1. ¿Como resultado de qué procesos se produce el campo magnético?
2. ¿Por qué la afirmación de que en un punto dado del espacio existe solamente un campo eléctrico o solamente un campo magnético no es del todo determinada?
3. ¿Cómo están orientados mutuamente los vectores \vec{E} , \vec{B} y \vec{c} en la onda electromagnética?
4. ¿Cómo debe moverse una partícula para que emita ondas electromagnéticas?
5. ¿Cómo depende la energía que emite un oscilador en la unidad de tiempo de la frecuencia de las oscilaciones?

5.6.

A. S. Popov, inventor de la radio

Los experimentos de Hertz, cuya descripción se hizo pública en 1888, interesaron a todos los físicos del mundo. Los científicos empezaron a buscar las vías de perfeccionamiento del emisor y del receptor de las ondas electromagnéticas.

En Rusia uno de los primeros en ocuparse del estudio de las ondas electromagnéticas fue el profesor de los cursos de minas, para oficiales, de Kronshadt, Alexandr POPOV. Éste empezó por repetir los experimentos de Hertz y después encontró un procedimiento más seguro y sensible de registrar las ondas electromagnéticas.

Como elemento directamente sensible a las ondas electromagnéticas empleó el *cohesor*. Este dispositivo consiste en un tubo de vidrio con dos electrodos. Dentro del tubo hay finas limaduras metálicas. Su funcionamiento se basa en la influencia de las cargas eléctricas sobre los polvos metálicos. En las condiciones normales el cohesor posee gran resistencia, ya que entre las limaduras el contacto que existe es malo. La onda electromagnética que llega crea en el cohesor una corriente alterna de alta frecuencia. Entre las limaduras saltan chispas pequesísimas que las sueldan. Como resultado la resistencia del cohesor disminuye bruscamente (en los experimentos de Popov desde 100 000 Ω hasta 1000 ó 500 Ω , es decir, de 100 a 200 veces). El dispositivo puede volver a tener gran resistencia si se sacude. Para asegurar la recepción automática necesaria para la comunicación inalámbrica, Popov utilizó como descohesor un timbre eléctrico, el cual sacudía el cohesor después de cada señal recibida. El circuito del timbre eléctrico se cerraba a través del cohesor en el instante en que llegaba la onda electromagnética. Cuando terminaba de recibirse la onda el timbre dejaba de funcionar inmediatamente, ya que su martillito percutía no sólo la campanilla del timbre, sino también el cohesor. La última sacudida dejaba el aparato dispuesto para recibir una nueva onda.

Con el fin de elevar la sensibilidad del aparato, Popov unió a tierra una de las salidas del cohesor y la otra la conectó a un trozo de alambre puesto en alto, con lo que creó la primera *antena receptora*. La puesta a tierra convierte la superficie conductora de ésta en una parte del circuito oscilante abierto, con lo que aumenta la distancia de recepción. Un esquema simplificado del receptor de Popov se da en la fig. 101.

Aunque los receptores de radio modernos se parecen poco al de Popov, los principios básicos de su funcionamiento son los mismos que él utilizó en su



Alexandr Stepanovich Popov (1859-1906), célebre físico ruso, inventor de la radio. Convencido en la posibilidad de la comunicación inalámbrica por medio de las ondas electromagnéticas, construyó el primer receptor de radio del mundo, utilizando como elemento sensible un cohesor. Durante los experimentos de radiocomunicación con los aparatos de Popov se descubrió la reflexión de las ondas hertzianas en los buques.

aparato. El receptor moderno también tiene antena, en la cual la onda que llega excita oscilaciones eléctricas muy débiles. Como en el receptor de Popov, la energía de estas oscilaciones no se emplea directamente en la recepción. Las señales débiles lo único que hacen es regular las fuentes de energía que alimentan los circuitos siguientes. Ahora esta regulación se hace por medio de válvulas electrónicas y de dispositivos semiconductores.

El 7 de mayo de 1895, en la sesión de la Sociedad Físico-química Rusa de San Petersburgo, A. S. Popov demostró el funcionamiento de su aparato, que, en realidad, fue el primer receptor de radio del mundo. El 7 de mayo devino en día de nacimiento de la radio. Este día se conmemora anualmente en la URSS.

Popov continuó con tesón el perfeccionamiento de los aparatos receptores y transmisores. Su tarea inmediata fue la de construir un aparato para transmitir señales a gran distancia. En diciembre de 1897 demostró en la sesión

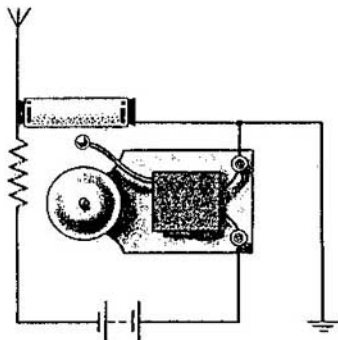


Fig. 101

de la Sociedad Físico-química Rusa la transmisión y recepción del primer radiograma en el mundo.

Al principio la comunicación por radio fue establecida a la distancia de 250 m. Trabajando incansablemente en su invento, Popov consiguió pronto una distancia de comunicación de 600 m. Más tarde, en las maniobras de la escuadra del Mar Negro en 1899, estableció la comunicación por radio a una distancia de más de 20 km, y en 1901 el alcance de la radiocomunicación era ya de 150 km. En esto desempeñó un papel muy importante la nueva estructura del transmisor. El espacio de chispa fue incluido en un circuito oscilante acoplado por inducción a la antena emisora y sintonizado en resonancia con ella. También cambiaron esencialmente los procedimientos de registro de la señal. En paralelo al timbre se conectó un aparato telegráfico que permitió anotar automáticamente las señales. En 1899 se descubrió la posibilidad de recibir señales por medio de un teléfono. A principios del año 1900 la radiocomunicación se utilizó eficazmente durante unos trabajos de salvamento en el Golfo de Finlandia.

Posteriormente, una compañía organizada por el ingeniero italiano Guglielmo MARCONI se dedicó a perfeccionar estos aparatos. Sus experimentos, montados en gran escala, permitieron realizar la transmisión radiotelegráfica a través del Océano Atlántico (1903).

5.7. Principios básicos de la radiocomunicación

Los principios en que se basa la radiocomunicación son los siguientes. La corriente eléctrica alterna de alta frecuencia creada en la antena transmisora produce en el espacio circundante un campo electromagnético rápidamente variable que se propaga en forma de onda electromagnética. Cuando esta onda llega a la antena receptora provoca en ella una corriente alterna de la misma frecuencia que aquella con que funciona el transmisor.

Una etapa muy importante en el desarrollo de la radiocomunicación fue la creación en 1913 del generador de lámpara de oscilaciones electromagnéticas no amortiguadas (véase el § 2.11).

Además de la transmisión de señales telegráficas, consistentes en impulsos cortos y más largos de ondas electromagnéticas (fig. 102), se hizo posible la comunicación radiofónica segura y de alta calidad de la palabra y la música por medio de las ondas electromagnéticas.

COMUNICACIÓN RADIOTELEFÓNICA. En la radiotelefonía las oscilaciones de la presión del aire en la onda sonora se transforman por medio de un micrófono en oscilaciones eléctricas de la misma forma. Al parecer, si estas oscilaciones se amplifican y se conducen a la antena, se podrá transmitir

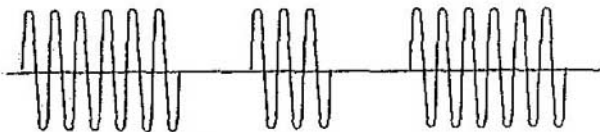


Fig. 102

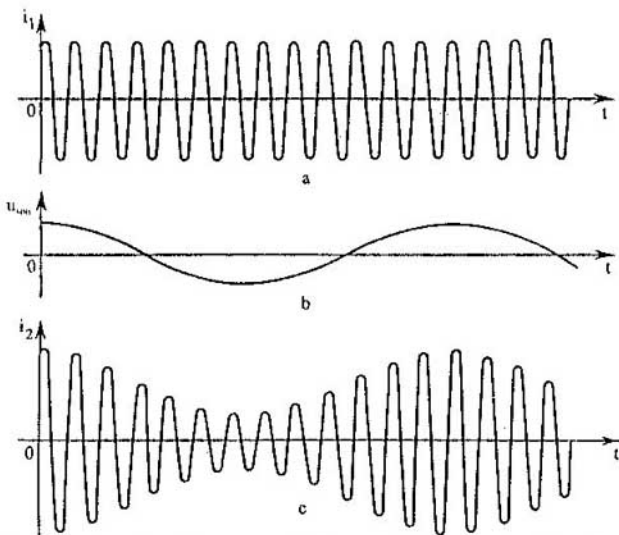


Fig. 103

a distancia la palabra y la música con ayuda de las ondas electromagnéticas. Sin embargo, este procedimiento de transmisión es irrealizable en la realidad. El hecho es que las oscilaciones de frecuencia sonora son oscilaciones relativamente lentas, y las ondas electromagnéticas de frecuencia baja (acústica) casi no se irradian en absoluto.

MODULACIÓN. Para efectuar la comunicación radiotelefónica hay que utilizar las oscilaciones de alta frecuencia que emite intensamente la antena. Las oscilaciones armónicas no amortiguadas de alta frecuencia las produce un generador de lámpara. Para transmitir el sonido estas oscilaciones se modifican o, como suele decirse, *se modulan*, por medio de oscilaciones eléctricas de frecuencia baja (acústica). Se puede, por ejemplo, modificar con la frecuencia sonora la amplitud de las oscilaciones de alta frecuencia. Este procedimiento recibe el nombre de *modulación de amplitud*. En la fig. 103 se muestran tres gráficas: a) la gráfica de las oscilaciones de alta frecuencia, llamada *frecuencia portadora*, b) la gráfica de las oscilaciones de frecuencia sonora, es decir, de las oscilaciones moduladoras, y c) la gráfica de las oscilaciones de amplitud modulada. Sin la modulación, decía el físico y académico soviético L. I. MANDÉLSHTAM, podemos en el mejor de los casos constatar que una emisora funciona o no, y nada más. Sin modulación no existe transmisión alguna, ni telegráfica, ni telefónica, ni de televisión.

La modulación es un proceso LENTO. Es un proceso de variaciones en el sistema oscilante de alta frecuencia, en el cual éste tiene tiempo de realizar muchas de sus oscilaciones de alta frecuencia antes de que su amplitud varíe algo de un modo apreciable.

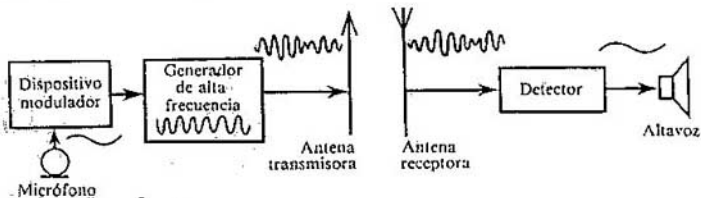


Fig. 104

DETECCIÓN. En el receptor, a partir de las oscilaciones moduladas de alta frecuencia, se discriminan las oscilaciones de baja frecuencia. Este proceso de transformación de la señal se llama *desmodulación* o *detección*.

La señal obtenida como resultado de la detección corresponde a la señal sonora que actuó sobre el micrófono del transmisor. Una voz amplificadas, las oscilaciones eléctricas de baja frecuencia se pueden transformar en sonido o ser utilizadas para otros fines.

El diagrama sinóptico (de bloques) de un canal de radiodifusión se muestra en la fig. 104.

5.8. Cómo se efectúa la modulación y la detección

La modulación de amplitud de las oscilaciones de alta frecuencia se consigue ejerciendo una acción especial sobre el generador de oscilaciones no amortiguadas. En particular, la modulación se puede efectuar variando la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo del triodo de un generador de lámpara. Cuanto mayor sea la tensión entre el ánodo y el cátodo, tanto mayor será la amplitud de las oscilaciones de la intensidad de la corriente en el circuito anódico de la lámpara del generador. Respectivamente, cada período llegará al circuito oscilante del generador más energía de la fuente. Esto hará que aumente la amplitud de las oscilaciones eléctricas en el circuito. Cuando la tensión anódica disminuya, la energía que cada período llegue al circuito oscilante también disminuirá. Por esta razón decrece al mismo tiempo la amplitud de las oscilaciones del circuito.

Si la tensión anódica se varía con una frecuencia mucho menor que la frecuencia de las oscilaciones que produce el generador, las variaciones de la amplitud de estas oscilaciones serán, aproximadamente, directamente proporcionales a las modificaciones de la tensión entre el ánodo y el cátodo.

Para efectuar la modulación de amplitud se conecta en serie con la fuente de tensión anódica continua una fuente adicional de tensión alternativa de baja frecuencia. Esta segunda fuente puede ser, por ejemplo, el arrollamiento secundario de un transformador, si por su arrollamiento primario pasa una corriente de frecuencia acústica (fig. 105). Como resultado, la amplitud de las oscilaciones en el circuito oscilante del generador cambiará con el ritmo de las variaciones de la tensión anódica. Esto en efecto significa que las oscilaciones de alta frecuencia se modulan según la amplitud de la señal de baja frecuencia.

El desarrollo con el tiempo de las oscilaciones moduladas se puede observar

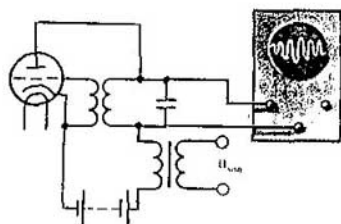


Fig. 105

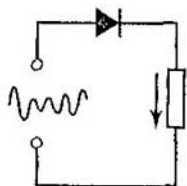


Fig. 106

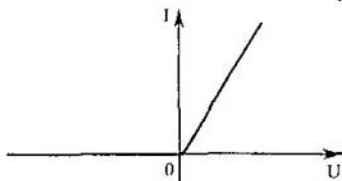


Fig. 107

directamente en la pantalla de un oscilógrafo si se hace llegar a él la tensión del circuito oscilante.

Además de la modulación de amplitud, en ciertos casos se utiliza la modulación de frecuencia, es decir, la variación de la frecuencia de las oscilaciones de acuerdo con la señal de mando. Su ventaja es una mayor estabilidad respecto de las perturbaciones.

DETECCION. La señal de alta frecuencia modulada captada por el receptor es incapaz, incluso después de amplificada, de producir directamente oscilaciones de la membrana del auricular o de la bocina del altavoz con frecuencia sonora. Sólo puede provocar oscilaciones de alta frecuencia imperceptibles para el oído humano. Por eso en el receptor hay que separar primeramente de las oscilaciones moduladas de alta frecuencia la señal de frecuencia acústica.

La detección se efectúa con un dispositivo que contiene un elemento CONDUCTOR UNILATERAL denominado *detector*. Este elemento puede ser un tubo electrónico (diodo de vacío o triodo) o un diodo semiconductor.

Veamos cómo funciona un detector semiconductor. Supongamos que este dispositivo está intercalado en el circuito en serie con la fuente de las oscilaciones moduladas y la carga¹⁾ (fig. 106). La corriente en el circuito pasará con preferencia en el sentido indicado en la figura con la flecha, ya que la resistencia del diodo en el sentido directo es mucho menor que en el inverso. En general se puede despreciar la corriente inversa y considerar que el diodo posee conductibilidad unilateral. La característica tensión-intensidad del diodo se puede representar aproximadamente en forma de una línea quebrada compuesta por dos segmentos rectilíneos (fig. 107).

¹⁾ Se llama carga del detector la resistencia a la que llegan las oscilaciones de frecuencia acústica.

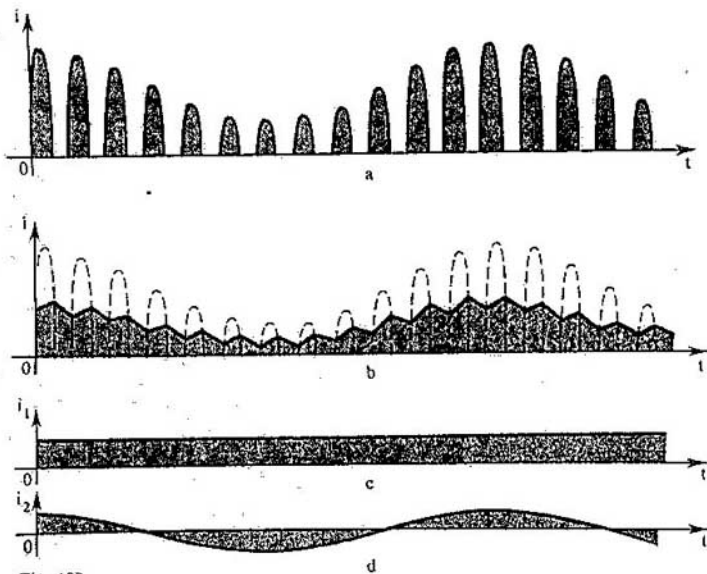


Fig. 108

Por el circuito representado en la fig. 106 pasará una corriente pulsatoria, cuya gráfica se muestra en la fig. 108 a. Esta corriente pulsatoria se atenúa por medio de un filtro. El filtro más simple es un condensador conectado en paralelo a la carga (fig. 109). El filtro funciona como sigue. En los instantes en que el diodo deja pasar la corriente, una parte de ésta pasa a través de la carga, mientras que la otra se deriva al condensador y lo carga (véanse las flechas de línea continua de la fig. 109). La derivación de la corriente hace que disminuyan los impulsos que pasan por la carga. En cambio, en el intervalo entre los impulsos, cuando el diodo está cerrado, el condensador se descarga parcialmente a través de la carga.

Por eso en el intervalo entre los impulsos la corriente pasa por la carga en

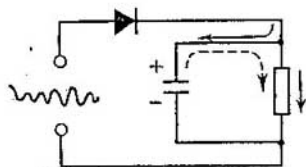


Fig. 109

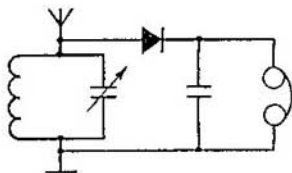


Fig. 110

este mismo sentido (véase la flecha de trazos en la fig. 109). Cada nuevo impulso recarga el condensador. Como resultado de esto a través de la carga pasa corriente de frecuencia sonora cuyas oscilaciones tienen una forma que casi reproduce la de la señal de baja frecuencia en la estación transmisora (véase la fig. 108, *b*). Esta corriente se puede considerar como la suma de una corriente continua (fig. 108, *c*) y de una corriente alterna de baja frecuencia (fig. 108, *d*).

Un simple receptor de galena consta de un circuito oscilante, acoplado a la antena, y de un circuito conectado al oscilante, formado por el detector y los auriculares (fig. 110). Las bobinas de los auriculares desempeñan el papel de carga. A través de ellas pasa corriente de frecuencia acústica. Las pequeñas pulsaciones de alta frecuencia no influyen apreciablemente en las oscilaciones de las membranas y no son percibidas por el oído.

5.9 Propiedades de las ondas electromagnéticas

Los aparatos radiotécnicos modernos dan la posibilidad de hacer experimentos muy intuitivos para observar las propiedades de las ondas electromagnéticas. Para esto conviene utilizar las ondas de la gama centimétrica. Estas ondas son emitidas por un generador de ultraalta frecuencia especial (UAF). Las oscilaciones de este generador se modulan con frecuencia acústica. La señal recibida, una vez detectada, se conduce a un altavoz.

Las ondas electromagnéticas se emiten a través de una antena de bocina (piramidal) en dirección del eje de ésta¹⁾. La antena receptora, que es de la misma forma que la emisora, capta las ondas que se propagan a lo largo de su eje. La vista general de la instalación se muestra en la fig. 111.

ABSORCIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. Se colocan las bocinas una frente a otra y, una vez que se logra que el sonido se oiga bien en el altavoz, se interponen entre aquéllas distintos cuerpos dieléctricos, con esto se observa cómo disminuye la intensidad.

REFLEXIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. Si el dieléctrico se sustituye por una placa metálica, el sonido deja de oírse. Las ondas no llegan al receptor a causa de la reflexión. Ésta se produce bajo un ángulo igual al de incidencia, lo mismo que en el caso de las ondas mecánicas (véase el § 4.10). Para cerciorarse de esto las bocinas se disponen bajo ángulos iguales respecto de una chapa metálica grande (fig. 112). El sonido desaparece si se quita la chapa o si ésta se gira.

REFRACCIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. Las ondas electromagnéticas cambian de dirección (**SE REFRACTAN**) en los límites de un dieléctrico. Esto se pone de manifiesto valiéndose de un gran prisma triangular de parafina. Las bocinas se colocan formando cierto ángulo entre sí, lo mismo que al demostrar la reflexión. La chapa metálica se sustituye por el prisma (fig. 113). Quitando el prisma o haciéndolo girar se observa la desaparición del sonido.

¹⁾ Análogamente a como por medio del portavoz se crea el haz de ondas sonoras dirigidas (véase el § 4.10).

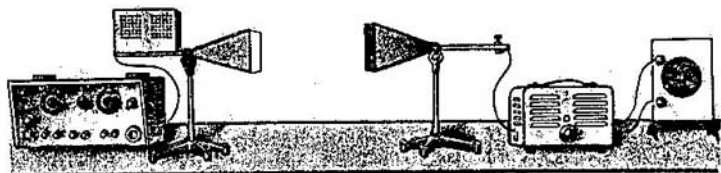


Fig. 111

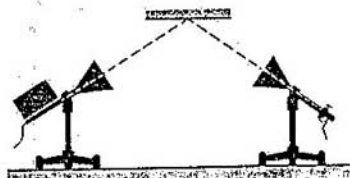


Fig. 112

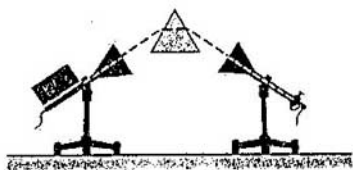


Fig. 113

CARÁCTER TRANSVERSAL DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. Las ondas electromagnéticas son *transversales*. Esto significa que los vectores \vec{E} y \vec{B} del campo electromagnético de la onda son perpendiculares a la dirección de su propagación. Las oscilaciones de la intensidad del campo eléctrico de la onda que sale de la bocina llegan en un plano determinado, y las oscilaciones del vector inducción magnética, en un plano perpendicular a aquél. Las ondas con dirección de oscilación determinada se dice que están *polarizadas*. En la fig. 95 se representa precisamente una onda polarizada. La bocina receptora con detector sólo capta la onda polarizada en una dirección determinada.

Esto se puede poner de manifiesto girando 90° la bocina transmisora o la receptora. Al hacer esto el sonido desaparece.

La polarización se observa interponiendo entre el generador y el receptor una red de varillas metálicas paralelas (fig. 114). La red se coloca de tal modo que las varillas queden horizontales o verticales. En una de estas posiciones, cuando el vector eléctrico es paralelo a las varillas, se excitan en ellas corrientes, como resultado de lo cual la red refleja la onda como si fuera una placa metálica continua.

Cuando el vector \vec{E} es perpendicular a las varillas, en éstas no se excitan corrientes y la onda electromagnética pasa.

INTERFERENCIA DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. En los experimentos con el generador de UAF también se puede observar un fenómeno ondulatorio tan importante como es la interferencia.

El generador y el receptor se colocan uno frente a otro (fig. 115). Después se acerca por abajo una placa metálica en posición horizontal. Elevando poco a poco la placa, se manifiestan sucediéndose unos a otros debilitamientos y reforzamientos del sonido.

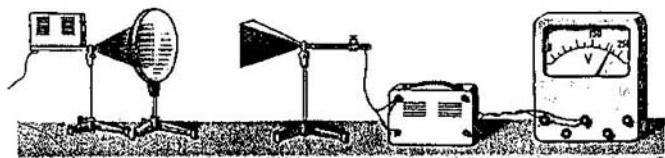


Fig. 114



Fig. 115

Este fenómeno se explica como sigue. Una parte de las ondas de la bocina del generador llegan directamente a la bocina receptora. Otra parte de ellas se refleja en la placa metálica. Variando la posición de la placa se varía la diferencia de marcha de las ondas directa y reflejada. En virtud de esto las ondas se refuerzan o se debilitan unas a otras, en dependencia de que dicha diferencia de marcha sea igual a un número entero de longitudes de onda o a un número impar de semilongitudes de onda.

También se puede observar la difracción de las ondas electromagnéticas.

5.10. Propagación de las ondas hertzianas

Cuando las ondas electromagnéticas se emplean para la radiocomunicación, tanto la fuente como el receptor de las ondas hertzianas se encuentran por lo general cerca de la superficie terrestre. La forma y las propiedades físicas de esta superficie y el estado de la atmósfera influyen mucho en la propagación de las ondas radioeléctricas.

En especial ejerce una influencia importante sobre la propagación de las ondas hertzianas la capa de gas ionizado de las partes superiores de la atmósfera que se hallan a 100 ... 300 km sobre la superficie de la Tierra. Esta capa se llama *ionosfera*. La ionización del aire de las capas superiores de la atmósfera se debe a la radiación electromagnética del Sol y al flujo de partículas cargadas que él emite.

La ionosfera es conductora de la corriente eléctrica y REFLEJA las ondas hertzianas de longitud $\lambda > 10$ m como si fuera una placa metálica ordinaria. Pero la capacidad de la ionosfera para reflejar y absorber las ondas radioeléctricas varía considerablemente en dependencia de la hora de cada día y de la estación del año¹⁾.

La radiocomunicación estable entre puntos lejanos sobre la superficie de la Tierra, que no se encuentren en la línea de visibilidad geométrica, resulta

¹⁾ Por eso la comunicación por radio en la banda de longitudes de onda medias (desde 100 hasta 1000 m) es mucho más segura de noche y en invierno.

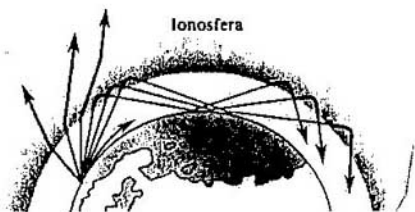


Fig. 116

posible gracias a la reflexión de las ondas en la ionosfera y a que las ondas hertzianas son capaces de rodear la superficie convexa de la Tierra (es decir, en virtud de la difracción). La difracción se manifiesta tanto más intensamente cuanto mayor es la longitud de onda. Por esta razón la radiocomunicación a grandes distancias, a expensas de que las ondas contornean la Tierra, se hace posible únicamente con longitudes de onda grandes, muy superiores a 100 m (*ondas medias y largas*).

Las *ondas cortas* (banda de longitudes de onda desde 10 hasta 100 m) se propagan a grandes distancias a costa solamente de reflejarse muchas veces en la ionosfera y en la superficie de la Tierra (fig. 116). Precisamente por medio de las ondas cortas se puede efectuar la comunicación por radio a cualquier distancia entre las estaciones emisoras de la Tierra.

Las ondas largas son menos aptas para este fin por ser absorbidas considerablemente tanto por las capas superficiales de la Tierra como por la ionosfera. No obstante, la comunicación por radio más segura a distancias limitadas, cuando la potencia de las emisoras es suficiente, se consigue con las ondas largas.

Las *ondas ultracortas* ($\lambda < 10$ m) atraviesan la ionosfera y casi no contornean la superficie de la Tierra. Por eso se utilizan para la comunicación entre puntos situados dentro de los límites de la visibilidad geométrica y también para la comunicación con las naves cósmicas.

5.11. Radiolocalización

En la técnica moderna el fenómeno de la reflexión de las ondas hertzianas por diversos obstáculos encuentra una amplia utilización. Receptores de alta sensibilidad captan y amplifican la señal reflejada con el fin de obtener información acerca de dónde se encuentra el objeto en que se refleja la onda.

El descubrimiento y la determinación exacta del punto en que se encuentra un objeto por medio de las ondas hertzianas se llama radiolocalización. La instalación para la radiolocalización, es decir, el radiolocalizador o radar¹⁾, consta de una parte transmisora y de otra receptora. Para la radiolocalización

¹⁾ Abreviación de "Radio Detection and Ranging", *detección y medición de distancias por radio*.

se utilizan oscilaciones eléctricas de frecuencia ultraalta (desde 10^8 hasta 10^{11} Hz). El potente generador de UAF está acoplado a una antena que emite una onda filiforme. En los radiolocalizadores que funcionan con longitud de onda del orden de 10 cm y menores, esta onda la crean antenas en forma de espejos parabólicos. Para las ondas de la gama de a metro, las antenas tienen la forma de complejos sistemas de osciladores. En este caso la radiación de haz filiforme se obtiene en virtud de la interferencia de las ondas. La antena se estructura de tal forma que las ondas emitidas por cada uno de los osciladores, al componerse, sólo se refuerzan unas a otras en la dirección preestablecida. En las demás direcciones se atenúan parcial o totalmente.

La onda reflejada la capta la misma antena emisora u otra antena receptora también de haz filiforme. La manifiesta directividad de la radiación permite referirse al "rayo" del radiolocalizador. La dirección en que se encuentra el objeto se determina por la dirección del rayo en el instante en que se recibe la señal reflejada.

Para hallar la distancia hasta el objeto se utiliza el régimen de radiación por impulsos. El emisor irradia ondas a impulsos cortos. La duración de cada impulso es de millonésimas de segundo y los intervalos entre ellos son, aproximadamente, 1000 veces mayores. Durante las pausas se captan las ondas reflejadas.

La distancia R se determina midiendo el tiempo total t que tardan las ondas en recorrer el camino hasta el objeto y retornar. Como la velocidad de las ondas hertzianas $c = 3 \cdot 10^8$ m/s es prácticamente constante, resulta que

$$R = \frac{ct}{2}.$$

A causa de la dispersión de las ondas, hasta el receptor sólo llega una parte insignificante de la energía que irradia el emisor. Por eso los receptores de radiolocalización amplifican la señal recibida billones (10^{12}) de veces. Este receptor tan sensible, por supuesto, debe estar desconectado en el instante en que el emisor lanza el impulso. No obstante, la potencia instantánea del emisor durante la radiación del impulso es tan grande (de decenas, centenares y hasta millares de kilovatios) que la influencia del dispositivo transmisor no se elimina totalmente. Para fijar las señales emitida y reflejada se utiliza un tubo de rayos catódicos. En el instante en que se emite el impulso, el punto brillante, que se mueve uniformemente por la pantalla del tubo, se desvía. En la pantalla se ve un pico junto al cero de la escala de distancias (fig. 117). El punto brillante continúa moviéndose uniformemente a lo largo de la pantalla y en el instante en



Fig. 117

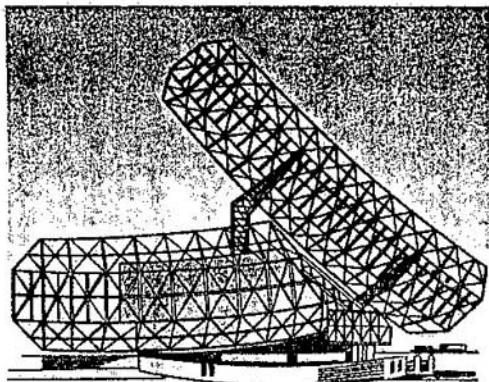


Fig. 118

que se recibe la débil señal reflejada, vuelve a desviarse. La distancia entre los picos en la pantalla es proporcional al tiempo t que tarda la señal en su recorrido y, por lo tanto, es proporcional a la distancia R hasta el objeto. Esto da la posibilidad de graduar la escala directamente en kilómetros.

Las instalaciones de radiolocalización descubren los buques y los aviones a distancias de hasta varios centenares de kilómetros. En su funcionamiento influyen poco las condiciones meteorológicas y la hora del día. En los grandes aeropuertos los localizadores vigilan los aviones que despegan y los que vienen a tomar tierra. El servicio de tierra del aeropuerto transmite por radio a los pilotos las instrucciones necesarias y de este modo garantiza la seguridad de los vuelos. El aspecto exterior de un localizador de aeropuerto puede verse en la fig. 118. Los buques y los aviones también se proveen de radiolocalizadores con fines propios de la navegación. Estos localizadores crean en la pantalla una figura con la disposición de los objetos dispersores de las ondas hertzianas. El operador tiene ante la vista el mapa por puntos (mapa radar) del lugar.

En la actualidad la radiolocalización se emplea con fines más diversos cada vez. Los localizadores sirven para observar los meteoros en las capas superiores de la atmósfera, para observar las nubes y predecir el tiempo y para investigaciones cósmicas. Cada nave cósmica tiene necesariamente a bordo varios localizadores. En 1946 en EE. UU. y Hungría se hizo un experimento de recepción de la señal reflejada en la superficie de la Luna. En 1961 un grupo de científicos soviéticos efectuó la radiolocalización del planeta Venus, lo que dio la posibilidad de hallar el periodo de rotación del planeta alrededor de su eje. En la actualidad se ha realizado ya la localización de otros planetas del sistema solar.

5.12. Idea de la televisión

Se encuentra en desarrollo impetuoso una rama relativamente nueva de la radioelectrónica, la *televisión*.

El principio en que se basa la transmisión de las imágenes a distancia

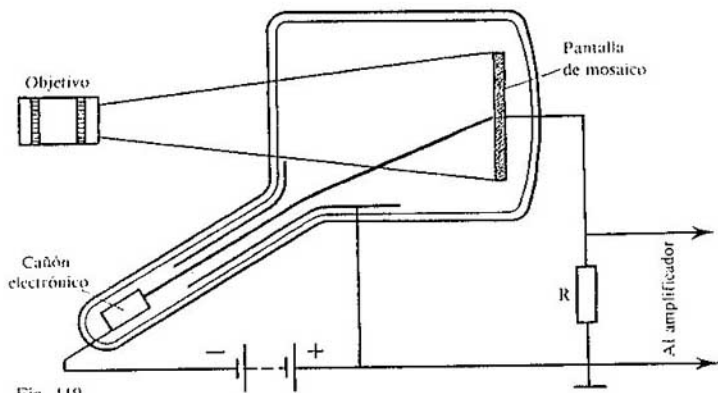


Fig. 119

consiste en lo siguiente. En la estación emisora se transforma la imagen en una sucesión de señales eléctricas. Estas señales modulan después las oscilaciones que produce un generador de alta frecuencia. La onda electromagnética modulada transporta la información a grandes distancias. En el receptor se efectúa la transformación inversa. Las oscilaciones de alta frecuencia moduladas se detectan y la señal que se obtiene se transforma en imagen visible. Para transmitir el movimiento se utiliza el principio del cinematógrafo: imágenes del objeto en movimiento, que se diferencian muy poco entre sí (fotogramas), se transmiten decenas de veces por segundo.

La transformación de la imagen de un fotograma en una serie de señales eléctricas se consigue por medio de un tubo catódico especial llamado *iconoscopio* (fig. 119). Dentro del iconoscopio hay una pantalla de mosaico sobre la cual se proyecta, por medio de un sistema óptico, la imagen del objeto. Cada una de las células del mosaico se carga de manera que su carga depende de la energía luminosa que incide sobre ella. Esta carga varía cuando sobre la célula incide el haz electrónico que crea el cañón de electrones. El haz electrónico va incidiendo paso a paso sobre todos los elementos, primero de una línea del mosaico, después de otra y así sucesivamente. De la intensidad con que varía la carga de la célula depende la intensidad de la corriente del impulso que pasa por la resistencia R . Por eso la tensión en la resistencia R varía proporcionalmente a la variación que experimenta la iluminación a lo largo de las líneas del cuadro.

Una señal de este tipo se obtiene en los receptores de televisión después de la detección. Ésta es la *señal de imagen* o *videoseñal*, la cual se transforma en imagen visible sobre la pantalla del tubo catódico receptor o *cinescopio*. El cañón electrónico de este tubo tiene un electrodo que regula el número de electrones que lleva el haz y, por consiguiente, la iluminación de la pantalla en el punto de incidencia de éste. Un sistema de bobinas de desviación horizontal y vertical obligan al haz electrónico a explorar o barrer toda la pantalla

exactamente del mismo modo que en el iconoscopio el haz electrónico explora la pantalla de mosaico. El movimiento sincrónico de los haces de los tubos transmisor y receptor se consigue emitiendo señales sincronizadoras especiales.

Las señales de televisión sólo se pueden transmitir en la gama de ondas ultracortas (métricas). Estas ondas sólo se propagan de ordinario dentro de los límites de la visibilidad geométrica de la antena. Por eso, para que la radiodifusión visual abarque un gran territorio es necesario situar los transmisores de televisión poco espaciados y elevar lo más posible sus antenas. La torre de televisión de Moscú tiene 540 m de altura y asegura la buena recepción en un radio de 120 km. Actualmente la red de televisión de la URSS cuenta con más de 3500 estaciones de televisión, cuyas emisiones son captadas por cerca de 100 millones de receptores (televisores). La zona de recepción segura de televisión crece continuamente, en particular, en virtud del empleo de los satélites retransmisores.

Cada vez se extiende más la televisión en color. Para obtener la imagen en color se transmiten tres videosñales portadoras de los componentes de la imagen correspondientes a los colores fundamentales (rojo, verde y azul).

5.13. Desarrollo de los medios de comunicación en la URSS

En la Unión Soviética se está creando un sistema unificado de comunicación automatizada. Para eso se desarrollan, perfeccionan y encuentran continuamente nuevas áreas de aplicación los distintos medios técnicos de comunicación.

Hasta hace relativamente poco tiempo la comunicación telefónica interurbana se efectuaba exclusivamente por medio de líneas aéreas de telecomunicación, con lo que en la seguridad de la comunicación influían las tormentas y las posibles congelaciones de los conductores. Hoy se utilizan cada vez más las líneas de cable y de relés repetidores y se eleva el nivel de automatización de las comunicaciones.

Las líneas de relés repetidores de comunicación emplean ondas ultracortas (decimétricas y centimétricas). Estas ondas sólo se propagan dentro de los límites de la visibilidad geométrica. Por eso las líneas están formadas por cadenas de estaciones de radio poco potentes, cada una de las cuales transmite las señales que recibe a las estaciones más próximas, como si se tratara de una carrera de relevos. Estas estaciones tienen mástiles de 60 a 80 m de altura y se hallan de 40 a 60 km de distancia una de otra.

Los éxitos obtenidos en el campo de la radiocomunicación cósmica han permitido crear un nuevo sistema de comunicaciones, llamado "Órbita". En este sistema se utilizan satélites retransmisores (fig. 120). Los satélites se sitúan en órbitas muy alargadas. El periodo de rotación de estos satélites es de, aproximadamente, 12 h. Han sido creados sistemas potentes y seguros de tele-difusión en las regiones de Siberia y del Extremo Oriente que permiten efectuar las comunicaciones teléfono-telegráficas con las zonas más lejanas del país.

Se perfeccionan y encuentran nuevos empleos medios de comunicación relativamente anticuados, como el telégrafo y el fototelégrafo.

De la amplitud que ha alcanzado la transmisión de imágenes inmóviles por

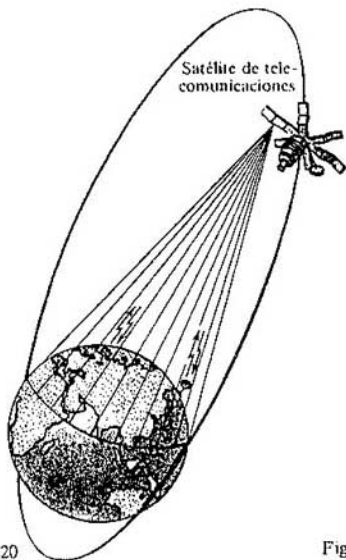


Fig. 120

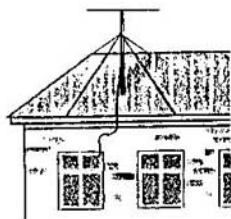


Fig. 121

fototelégrafo dan una idea las cifras siguientes: al año se transmiten por fototelégrafo hasta 70 mil planas de periódico, con las cuales se imprimen más de 3 mil millones de ejemplares de diarios centrales.

¿ ?

1. ¿Para qué se emplea la modulación de amplitud de las señales de alta frecuencia?
2. ¿En qué consiste el proceso de detección de las señales moduladas de alta frecuencia?
3. Enumere las propiedades que conozca de las ondas electromagnéticas.
4. ¿En qué principios se basa el funcionamiento del radar?

Ejercicio

5

1. ¿Se puede elegir un sistema de referencia en el cual la inducción magnética en el espacio, que rodea al conductor con corriente, sea nula?
2. Los osciladores emisor y receptor están dispuestos perpendicularmente entre sí. ¿Se producirán oscilaciones en el oscilador receptor?
3. En el esquema del receptor de radio representado en la fig. 110, $L = 2 \cdot 10^{-4}$ H y la capacidad C del condensador variable puede cambiar desde 12 hasta 450 pF. ¿Para qué longitudes de onda está calculado este receptor?
4. La fig. 121 representa la antena receptora de un televisor. ¿Qué puede decirse acerca de la orientación de las oscilaciones del vector inducción magnética de la onda que viene de la estación emisora?
5. ¿Existen diferencias esenciales entre las condiciones de propagación de las ondas hertzianas en la Luna y en la Tierra?

BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 5

Un campo magnético alternativo genera un campo eléctrico rotacional con líneas de intensidad cerradas. A esta conclusión llegó J. C. Maxwell al analizar el fenómeno de la inducción electromagnética. Más tarde supuso Maxwell que de un modo análogo el campo eléctrico alterno debe generar un campo magnético rotacional. En virtud de estos procesos las perturbaciones electromagnéticas se propagan con velocidad finita y existen las ondas electromagnéticas.

En el campo electromagnético tienen lugar oscilaciones de la intensidad \vec{E} del campo eléctrico y de la inducción magnética \vec{B} . Los vectores \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares entre sí y a la dirección en que se propaga la onda. Las ondas electromagnéticas son transversales.

La radiación de las ondas electromagnéticas se origina cuando cargas electrónicas oscilan rápidamente. La energía emitida en la unidad de tiempo es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia. Las primeras ondas electromagnéticas las obtuvo H. R. Hertz. Basándose en los experimentos de Hertz, A. S. Popov inventó la radio.

La comunicación radiotelefónica se efectúa como sigue. Las oscilaciones de alta frecuencia que produce un generador se modulan con las oscilaciones de baja frecuencia (acústica). La antena de la estación transmisora emite una onda electromagnética modulada. En el receptor de radio las oscilaciones de alta frecuencia moduladas se transforman en oscilaciones de baja frecuencia. Este proceso recibe el nombre de detección.