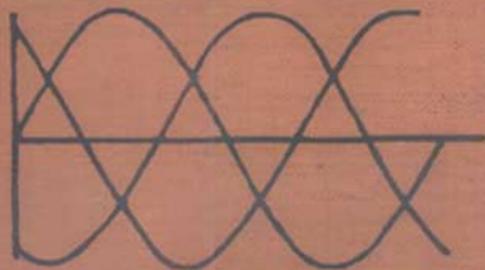


M. Kuznetsov

Fundamentos de electrotecnia





EDITORIAL MIR

М. И. КУЗНЕЦОВ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА»
МОСКВА**

На испанском языке

M. KUZNETSOV

FUNDAMENTOS DE ELECTROTECNIA

2-a edición

EDITORIAL MIR · MOSCU 1967

Traducido del ruso por
E. YUDKEVICH

Derechos reservados
Impreso en la URSS

ELECTROSTATICA

§ 1. Moléculas y átomos

La ciencia, habiendo estudiado en el transcurso de varios siglos las distintas sustancias que componen el mundo que nos rodea, ha llegado a la conclusión de que, a pesar de la diversidad de las sustancias existentes, todas ellas se componen de elementos simples. Ha sido establecido que en la naturaleza existen 104 elementos químicos. Cada elemento se compone de ciertas partículas llamadas átomos. Los átomos de diferentes elementos no son semejantes, sino que presentan determinadas propiedades inherentes, mientras que los átomos de un mismo elemento son iguales y conservan todas las características del elemento dado. Los átomos de un elemento químico que tienen igual carga en el núcleo e iguales propiedades químicas, pero que se diferencian por su masa, reciben la denominación de *isótopos*. La combinación de átomos homogéneos forma un elemento simple, la combinación de átomos heterogéneos forma una sustancia compuesta. Un grupo de átomos unidos químicamente forman lo que se denomina *molécula*. Así, por ejemplo, la molécula de agua se compone de tres átomos: dos de hidrógeno y uno de oxígeno. La molécula de ácido sulfúrico se compone de dos átomos de hidrógeno, uno de azufre y cuatro de oxígeno.

Las moléculas de algunos ácidos contienen centenas de átomos. La molécula de albúmina consta de millares de átomos de hidrógeno, carbono, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre.

Analizando las propiedades de los elementos, el célebre químico ruso Mendeleev clasificó, en 1869, todos los elementos simples, conocidos en aquel entonces según el aumento progresivo de su peso atómico, comenzando por el hidrógeno ligero y terminando con los átomos pesados de plomo y bismuto. Mendeleev descubrió que las propiedades físicas y químicas de los elementos se repiten periódicamente. Tomando en consideración el peso atómico y las propiedades de los elementos, Mendeleev dividió su tabla en 92 partes. Al componer la tabla, en ésta fueron dispuestos los 64 ele-

mentos conocidos. Mendeleev no se limitó a incluir los elementos conocidos en su tabla: convencido profundamente de que había establecido una de las leyes más importantes de la naturaleza, pudo prever caracterizando sus propiedades principales, la existencia en la naturaleza de elementos todavía por descubrir. El posterior descubrimiento de los elementos galio, escandio, germanio y otros confirmó brillantemente la previsión científica de Mendeleev.

§. 2. Nociones generales sobre la electricidad y la teoría electrónica

Durante mucho tiempo se tenía la creencia de que los átomos eran partes primarias, indivisibles e invariables de todos los cuerpos de la naturaleza, de donde surgió la denominación de «átomo», que en griego significa «indivisible».

A fines del siglo pasado, los físicos observaron al hacer pasar una corriente eléctrica de alta tensión a través de un tubo con gas muy rarificado, una luminiscencia verdosa en el vidrio del tubo, originada por la acción de rayos invisibles. Estos surgían del electrodo unido al polo negativo de la fuente de corriente (cátodo). Por eso, los rayos recibieron la denominación de catódicos. Bajo la acción de un campo magnético, la mancha luminiscente se desplazaba hacia un lado. Los rayos catódicos se comportaban del mismo modo que un conductor de corriente en el campo magnético. El desplazamiento de la mancha verdosa se producía también bajo la influencia del campo eléctrico, con la particularidad de que el cuerpo cargado positivamente atraía los rayos catódicos y el cuerpo cargado negativamente los repelía. Este fenómeno hizo pensar que los rayos catódicos constituyen un flujo de partículas negativas, o sea, de electrones.

En 1895, el físico *Roentgen* descubrió unos rayos especiales, rayos X, que no se distinguían a simple vista, pero que eran capaces de pasar a través de muchos cuerpos opacos. Actualmente los rayos X se emplean ampliamente en la medicina y en la industria. En 1896 se descubrió que las substancias compuestas de uranio eran capaces de actuar en la oscuridad sobre una placa fotográfica. Poco tiempo después *María Skłodowska Curie* y su esposo *Pierre Curie* descubrieron que el elemento torio, igual que el uranio, tiene la propiedad de irradiar rayos invisibles que pasan a través de los cuerpos opacos. En 1898 los esposos Curie descubrieron dos nuevos elementos: radio y polonio, que poseían la misma propiedad que el uranio y el torio. Curie dieron el nombre de **r a d i a c t i v i d a d** a la propiedad que tienen ciertos elementos de irradiar rayos invisibles. Estudiando el radio, los Curie descubrieron que este metal blando y plateado irradiaba luz en la oscuridad, descompone el agua en oxígeno e hidrógeno, actúa sobre una placa fotográfica y desprende ininterrum-

pidamente calor. El radio, al desintegrarse, emite rayos de tres clases: alfa, beta y gamma. A consecuencia de la desintegración continua, el radio se convierte en plomo, un elemento estable.

Los rayos catódicos, rayos X, la radiactividad y otros fenómenos físicos, químicos y magnéticos permitieron llegar a la conclusión de que el átomo no es una partícula indivisible de la materia, sino que tiene una estructura compleja. Las investigaciones científicas han demostrado que el átomo está compuesto tanto de partículas con carga eléctrica, como de partículas neutras.

De acuerdo con la teoría moderna de la estructura de la materia, cada átomo consta de un núcleo, alrededor del cual giran electrones.

El núcleo está cargado de electricidad positiva y los electrones, de electricidad negativa.

Generalmente el átomo no manifiesta ninguna propiedad eléctrica (es neutro). Sin embargo, esto no significa ausencia de electricidad en el mismo, sino que la electricidad positiva es igual a la negativa, dando lugar a un equilibrio.

Los átomos de diferentes elementos químicos difieren por su peso (peso atómico), por la magnitud de la carga positiva del núcleo y la cantidad de electrones que giran alrededor de éste. Así, por ejemplo, en el átomo de hidrógeno, el elemento más ligero y más simple por su estructura, alrededor del núcleo gira un solo electrón (fig. 1); en el átomo de cobre, 29 electrones; en el átomo de oro, 79 electrones, etc. Al número de electrones que giran alrededor del núcleo, corresponde siempre el número del elemento en el sistema periódico de Mendeleev. Por ejemplo, el átomo del elemento 92 de la tabla, uranio, tiene un núcleo cargado con 92 unidades de electricidad positiva, y 92 electrones que giran alrededor del núcleo en numerosas órbitas.

Los electrones que giran en órbitas distantes son atraídos más débilmente por el núcleo del átomo, que los dispuestos en órbitas próximas al mismo. Bajo la acción de átomos cercanos, o debido a otras causas, se puede lograr que los electrones distantes abandonen sus órbitas.

Los átomos de todos los metales poseen electrones exteriores inestables que se desprenden fácilmente de sus órbitas, lo que explica la buena conductibilidad eléctrica de los mismos.

Los átomos de algunas otras sustancias retienen fuertemente los electrones alrededor de su núcleo, haciendo difícil su desprendimiento. Estas sustancias son malas conductoras de electricidad.

En 1912, los científicos rusos L. Mandelshtam y N. Papalexí llevaron a cabo un interesante experimento. Tomaron un anillo metálico (fig. 2), perpendicularmente al cuyo centro colocaron una aguja magnética. La aguja estaba orientada de norte a sur. Bajo la acción de una fuerza exterior hacían girar el anillo rápidamente, y después lo paraban bruscamente. En el preciso momento de parar el anillo, la aguja magnética giraba orientándose a lo largo del

eje del anillo, mas al pasar cierto tiempo ocupaba su posición primitiva. Dicho experimento se puede explicar del modo siguiente: durante la rotación del anillo los electrones libres junto con los átomos del metal se ponen en movimiento. El frenado brusco produce la parada de los átomos del metal, mientras que los electrones libres siguen moviéndose por inercia durante cierto tiempo. Por un tiempo breve se crea en el anillo una corriente eléctrica que

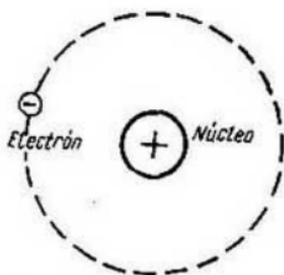


Fig. 1. Esquema de la estructura de un átomo de hidrógeno

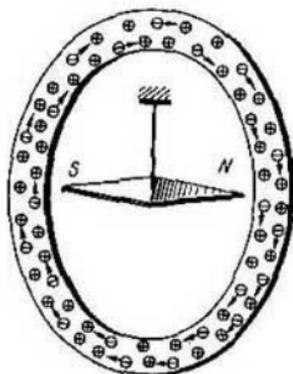


Fig. 2. Experimento de Papaloxi y Mandelshtam

produce un campo magnético el cual actúa sobre la aguja magnética.

Este experimento demuestra que en los metales existen electrones libres.

En estado normal los átomos de los metales, los iones (átomos que perdieron o adquirieron electrones), así como los electrones libres se encuentran en movimiento termal caótico. Si bajo la acción de una u otra causa hacemos que los electrones libres se desplacen en una dirección determinada, tal movimiento orientado, por ejemplo en un conductor metálico, resultará una corriente eléctrica.

Como ya se ha dicho, las cargas positiva y negativa en el átomo son iguales. Pero si los átomos de un cuerpo comienzan a perder electrones (por ejemplo, durante la electrización del cuerpo por frotamiento), la carga positiva del mismo llega a ser mayor, por lo que decimos que el cuerpo se carga positivamente.

Pero si el cuerpo recibe electrones, dando lugar a un exceso de éstos, el cuerpo se carga negativamente. Por ejemplo, si se frota vidrio con una piel, éste pierde electrones y se carga positivamente, mientras que la piel, recibiendo electrones del vidrio, se carga negativamente.

Un átomo eléctricamente neutro se carga perdiendo o recibiendo electrones. Este átomo se llama *ion*. El proceso de transformación de un átomo neutro en ion se llama *ionización*. Como ejemplo de ionización se pueden mencionar algunos metales (sodio, potasio), que al ser iluminadas sus superficies son capaces de desprender electrones. El honor de haber descubierto este fenómeno pertenece al conocido físico ruso A. Stolétov. Este fenómeno recibió el nombre de *efecto fotoeléctrico* y se emplea en las células fotoeléctricas.

Calentando un metal a alta temperatura, hacemos que los átomos de éste se muevan aún más rápidamente en forma desordenada. Los electrones que antes se mantenían en la órbita del átomo, ahora son omitidos por la superficie del metal calentado. Este fenómeno se denomina *efecto termiónico* y se utiliza en válvulas de radio, rectificadores y otros aparatos.

La molécula neutra de un gas puede ser ionizada bajo la acción de una alta temperatura, rayos X, rayos ultravioleta, irradiaciones radiactivas, alta tensión, así como al chocar esta molécula contra un electrón que se desplaza a gran velocidad (ionización por choque). Al hallarse las moléculas de las sustancias en un medio disolvente, disminuye la fuerza de unión interior y se descomponen en iones positivos y negativos.

La masa (peso) del electrón es muy pequeña: es 1.838 veces menor que la masa del núcleo atómico del gas más liviano, el hidrógeno. Por eso, al resolver algunos problemas, se puede considerar que el peso de un átomo de hidrógeno se determina exclusivamente por el peso del núcleo, cargado de electricidad positiva, denominado *protón*.

El segundo elemento en la tabla de Mendeleev después del hidrógeno es el helio. De acuerdo con la teoría electrónica un átomo de helio tiene dos protones en el núcleo y dos electrones que giran alrededor del núcleo. La carga del núcleo del helio es dos veces mayor que la del núcleo del hidrógeno. Sin embargo, el peso atómico del helio no es 2, sino 4. Si se supone que en el núcleo del helio hay cuatro protones, la cantidad de electricidad positiva será mayor que la de electricidad negativa, lo que es imposible. El científico soviético, profesor D. Ivanenko supuso que el núcleo de cada átomo contiene, además de las partículas cargadas positivamente, otras partículas que no tienen carga, pero cuya masa es igual a la del protón. Estas partículas fueron denominadas *neutrones*. De este modo, en el núcleo del átomo de helio, además de dos protones, hay dos neutrones. La estructura de un átomo de helio se muestra esquemáticamente en la fig. 3.

El átomo de hierro tiene en la tabla de Mendeleev el número atómico 26 y el peso atómico 56, por consiguiente, el núcleo de un átomo de hierro consta de 26 protones y de $56 - 26 = 30$ neutrones. Alrededor del núcleo del átomo de hierro giran 26 electrones. En la

fig. 4 está representada esquemáticamente la estructura de un átomo de uranio (número atómico 92, peso atómico 238).

Hemos tratado de presentar de un modo simplificado la estructura del átomo. En realidad el átomo tiene una estructura mucho más complicada.

Hemos visto la diferencia existente entre conductores y aisladores (dieléctricos) desde el punto de vista de la física clásica que estudia las leyes de los cuerpos macroscópicos, es decir, de los cuerpos compuestos de gran cantidad de átomos y electrones. La

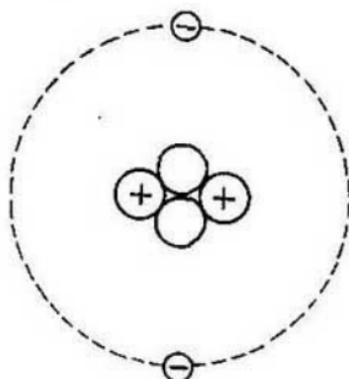


Fig. 3. Estructura de un átomo de helio

Dos electrones	Dos neutrones
Masa ≈ 0	Masa = 2
Carga = - 2	Carga = 0
Dos protones	Peso atómico = 4
Masa = 2	Número atómico = 2
Carga = +2	Carga del átomo = 0

física clásica nos dice que la diferencia existente entre los dieléctricos y los conductores, reside en que todos los electrones en el dieléctrico son retenidos fuertemente cerca del núcleo atómico, mientras que en los conductores, por el contrario, la atracción entre los electrones y el núcleo del átomo es débil, y hay gran cantidad de electrones libres cuyo movimiento ordenado origina la corriente eléctrica. La física clásica considera que la energía del átomo puede tener cualquier valor (entre ciertos límites) y que la variación de energía del átomo tiene lugar continuamente (sin interrupción) no importando la magnitud de la porción de energía emitida. Pero el estudio de los espectros ópticos de los elementos y de los fenómenos ligados con la interacción de átomos y electrones, indica el carácter intermitente de la energía interna de los átomos. La física atómica y la molecular demuestran que la energía de un átomo no puede ser indefinida, sino que tiene magnitudes bien determinadas, propias de cada átomo. Las magnitudes posibles de la energía interna del

átomo se denominan niveles de energía o cuánticos. Los niveles de energía que el átomo no puede poseer se denominan niveles prohibidos.

La física cuántica, que estudia cuerpos microscópicos y las leyes de su movimiento, nos da una explicación distinta de la diferencia entre dieléctricos y conductores. De acuerdo con la teoría cuántica, tanto en el dieléctrico, como en el conductor existen electrones libres. Los dieléctricos y conductores se diferencian sólo por el grado de llenado y disposición relativa de los niveles de energía

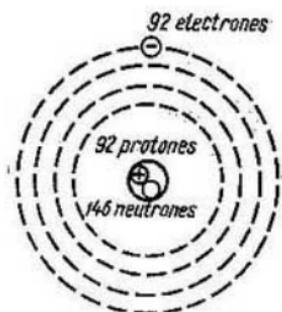


Fig. 4. Estructura de un átomo de uranio. Número atómico, 92. Peso atómico 238. La carga del átomo es igual a 0

de los electrones. Precisamente en esto reside el fundamento de la teoría de las bandas de conductividad eléctrica. La energía total de los electrones que giran alrededor del núcleo es tanto mayor, cuanto mayor es el radio de la órbita. El electrón puede encontrarse en un estado cuántico estrictamente determinado, en el cual no pueden hallarse otros electrones. Si desde el exterior se le comunica al electrón una cantidad determinada de energía, éste puede pasar a otro estado cuántico, superior. En este caso, el mismo electrón y el átomo del cual forma parte se llaman excitados. La transición del electrón de un nivel superior a otro inferior originará el salto del mismo a una órbita de radio menor, desprendiéndose ahora la energía que se gastó para el paso del electrón al estado excitado, en forma de un cuanto de luz de frecuencia determinada o pasando a otro electrón. El paso del electrón a otro estado cuántico es imposible si éste está ocupado por otro electrón. En un cuerpo sólido compuesto de gran cantidad de átomos, los niveles de energía de éstos se desplazan y, reuniéndose, forman bandas de energía.

Se distingue la banda llena o normal, donde se encuentran cargas eléctricas del átomo no excitado, y banda vacía o de excitación, donde pueden entrar electrones de átomo excitado. Entre las bandas llena y vacía se encuentra la banda reservada o de niveles reservados. La anchura de la banda reservada determina la conductividad eléctrica del cuerpo. El término «banda» no se debe entender

como un área o una franja de determinadas dimensiones geométricas. Cuando se trata de una «banda», se tiene en cuenta cierta cantidad de energía que poseen los electrones que se encuentran en ella. Se puede representar la estructura energética de un cuerpo en forma gráfica. En la fig. 5 se muestra la disposición de las bandas de energía de un cuerpo sólido. En los conductores (metales) las bandas llenas y vacías se recubren, entre ellas no existe la banda reservada (fig. 5, a), por eso, los electrones pasan fácilmente de la banda llena a la vacía y aseguran una alta conductividad eléctrica.

En los semiconductores el ancho de la banda reservada es pequeño (fig. 5, b). Bajo la acción de causas exteriores (calor, luz, campo

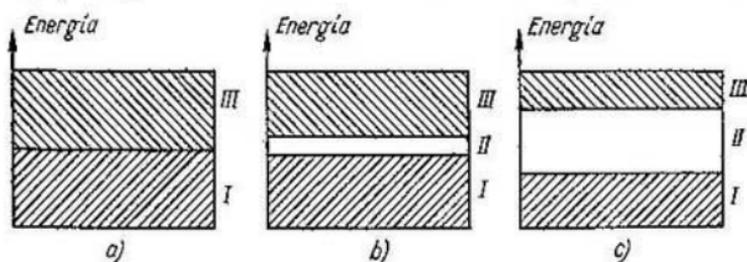


Fig. 5. Disposición de las bandas de energía de un cuerpo sólido: a — conductor, b — semiconductor, c — dieléctrico; I — banda llena (normal), II — banda reservada (banda de niveles reservados), III — banda libre (banda de excitación)

eléctrico, etc.) los electrones pueden superar la banda reservada y pasar de la llena a la vacía. En los dieléctricos la banda reservada es muy ancha (fig. 5, c) y se dificulta el paso de los electrones de la banda llena a la vacía. La conductividad eléctrica de tal cuerpo es prácticamente nula.

Además del protón, neutrón y electrón, el átomo se compone también de otras partículas. En determinadas condiciones, a consecuencia de transformaciones en el interior del núcleo, el átomo desprende una partícula que tiene una carga positiva. La masa de dicha partícula es igual a la del electrón y esta partícula se denomina positrón (electrón positivo). Los positrones fueron descubiertos por primera vez en los rayos cósmicos.

Como hemos visto, el núcleo del átomo se compone de partículas positivas o protones y neutras o neutrones. El enlace entre estas partículas dentro del núcleo no se realiza por medio de fuerzas eléctricas, sino nucleares. Para explicar el origen de las fuerzas nucleares se ha supuesto que deben existir partículas más pesadas que los electrones, pero más livianas que los protones. Dichas partículas fueron descubiertas en los rayos cósmicos y se denominan mesones. Ellos pueden llevar cargas positivas y negativas.

Durante la desintegración de un elemento radiactivo, éste desprende diferentes partículas, en particular, partículas alfa (núcleos positivamente cargados del átomo de helio) y partículas beta (elec-

trones negativos). Se ha notado que durante la desintegración beta, el átomo expulsa, además de electrones, partículas neutras más ligeras que los neutrones. Estas partículas recibieron la denominación de **neutrinos**. En octubre de 1955, los científicos, que trabajaban en la desintegración del átomo, descubrieron una nueva partícula elemental que llamaron **antiprotón** o **protón negativo**. De este modo, tenemos una serie de partículas elementales: protones y neutrones, mesones positivos y negativos, electrones, positrones, neutrinos y antiprotónes.

Mucho tiempo atrás los hombres conocían los fenómenos eléctricos. Hace 2.500 años, los antiguos griegos notaron que al frotar el ámbar con un paño aquél adquiría la propiedad de atraer cuerpos livianos. La fuerza que manifestaba el ámbar frotado, los griegos la llamaron fuerza eléctrica (en griego ámbar significa «elektrón»).

En Rusia, el estudio de los fenómenos eléctricos fue iniciado por M. Lomonósov (1711—1765). A él se debe la organización del primer laboratorio en Rusia para estudiar los fenómenos eléctricos. M. Lomonósov y G. Rijman investigaron los fenómenos de la electricidad atmosférica con una «máquina de truenos» y un «indicador eléctrico» que ellos inventaron. Lomonósov escribió la obra «Nociones sobre fenómenos atmosféricos originados por la fuerza eléctrica», en la que estableció la identidad de la electricidad con la triboelectricidad. Lomonósov consideraba la electricidad como una forma particular de movimiento, y no como cierto fluido imponderable. Predijo la posibilidad de transmitir la energía eléctrica a grandes distancias.

Al frotar el vidrio, la resina, la ebonita, el lacre y otros cuerpos, éstos adquieren la propiedad de atraer cuerpos livianos, o en otras palabras, se electrizan. El cuerpo electrizado puede entregar una parte de su carga eléctrica a otro (no electrizado), si éstos se ponen en contacto o se unen por medio de un alambre metálico. Pero si el cuerpo electrizado se une con uno no electrizado mediante una varita de vidrio, porcelana o ebonita, la carga no pasa del primer cuerpo al segundo. Los cuerpos que son capaces de conducir bien las cargas eléctricas se llaman **conductores eléctricos**. Entre éstos se incluyen todos los metales, carbón, soluciones de sales, ácidos y álcalis. Los cuerpos que conducen mal la electricidad se llaman **no conductores**, **aisladores** o **dieléctricos**. A éstos pertenecen todos los cuerpos gaseosos en su estado normal, muchos líquidos y casi todos los cuerpos sólidos, excepto los metales y el carbón. Entre los aisladores se cuentan la ebonita, el vidrio, la goma, la mica, la seda, la parafina, el mármol, los aceites de transformadores, etc.

También fue notado que los cuerpos electrizados se atraen o se repelen. Así, por ejemplo, si cargamos eléctricamente dos cuerpos con una varita de vidrio frotada con piel, éstos se repelen. Lo mismo ocurre si ambos cuerpos se cargan con una varita de ebonita frotada con un paño. Pero si un cuerpo se carga con una varita de vidrio, y otro, con una varita de ebonita, ambos cuerpos se atraerán. De

esta manera se ha logrado establecer que al electrizar diferentes cuerpos surgen dos clases de electricidad. Convencionalmente una clase fue denominada positiva, y la otra, negativa. Por consiguiente, los cuerpos cargados de electricidad del mismo signo se repelen mutuamente y los cargados de electricidad de diferente signo, se atraen.

Resumiendo lo expuesto anteriormente, formulemos la definición de la electricidad. *Electricidad es una propiedad de la materia (forma especial de movimiento de la materia) de doble naturaleza que se manifiesta en las partículas elementales de la substancia (electricidad positiva, en protones, positrones o mesones; la negativa, en electrones, antiprotones o mesones).*

§ 3. Sistemas de unidades de medición de las magnitudes eléctricas y magnéticas

Al dar comienzo al curso fundamental de electrotecnia nos encontramos en primer término con la medición de diferentes magnitudes eléctricas y magnéticas. Para medir estas magnitudes existen varios sistemas de unidades, por ejemplo: el electrostático absoluto, el electromagnético absoluto, el internacional práctico, el absoluto práctico y otros.

En el sistema CGS electrostático absoluto que se emplea preferentemente para medir magnitudes eléctricas, y en el sistema CGS electromagnético absoluto, que se emplea preferentemente para medir magnitudes magnéticas, las unidades principales son: centímetro (cm), gramo (g) y segundo (seg).

En el sistema centímetro-gramo-segundo (CGS) la unidad de velocidad es igual a 1 cm/seg; la unidad de aceleración es igual a 1 cm/seg²; la unidad de fuerza es la dina, igual a 1 cm·g/seg² (1 dina = 1 g·1 cm/seg²); la unidad de trabajo es el ergio, igual a 1 cm²·g/seg² (1 ergio = 1 dina·1 cm).

Los valores eléctricos y magnéticos expresados en estos sistemas no son cómodos para las investigaciones de laboratorio y uso práctico. Por eso más tarde fue adoptado el así llamado sistema internacional práctico de unidades (metro-kilogramo-segundo, MKS). En este sistema la unidad de resistencia eléctrica es el ohmio internacional y la unidad de intensidad de corriente eléctrica, el amperio internacional. Estas son las unidades fundamentales y se determinan del modo siguiente. El ohmio internacional es la resistencia al paso de la corriente de una columna de mercurio de 106,3 cm de longitud, a 0° C, 1 mm² de sección y 14,4521 g de masa. El amperio internacional se determina por la acción química de la corriente: es la corriente, invariable en el tiempo, que al pasar por una solución acuosa de nitrato de plata deposita 1,118 mg de plata por segundo.

Por estas dos unidades se determinaron todas las demás unidades eléctricas.

Actualmente en la URSS se emplea el sistema absoluto racionalizado MKSA *, apropiado para medir unidades eléctricas, magnéticas y mecánicas.

Las unidades básicas en este sistema son: unidad de longitud, el metro (m); unidad de masa, el kilogramo (kg); unidad de tiempo, el segundo (seg); unidad de intensidad corriente, el amperio absoluto (A).

En el sistema MKSA la unidad de velocidad, $v = 1 \text{ m/seg}$; unidad de aceleración, $a = 1 \text{ m/seg}^2$; unidad de fuerza, newton, $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2}$, es decir, una fuerza que comunica a la masa de un cuerpo de 1 kg una aceleración de 1 m/seg^2 . Unidad de trabajo, joule (julio): $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$.

En este sistema la unidad de intensidad de corriente (amperio absoluto o abamperio) se determina por medio de balanzas electrodinámicas, según la fuerza de interacción entre las bobinas móviles y fijas. El ohmio absoluto (abohmio) es una resistencia de la cual se desprende, al pasar por ésta una corriente de un amperio absoluto, la energía de 1 joule o 0,239 calorías por segundo. Las demás unidades eléctricas se determinan mediante el amperio y ohmio absolutos. El sistema MKSA se llama absoluto, porque sus tres unidades principales (de las cuatro), metro, kilogramo-masa y amperio, son múltiplos o décimas partes de las unidades correspondientes del sistema CGS electromagnético.

En particular, el amperio es igual a una décima parte de la unidad electromagnética absoluta de corriente. En lo sucesivo emitiremos la palabra «absoluto» al denominar las unidades electromagnéticas en el sistema MKSA.

El sistema MKSA se llama práctico, ya que se utiliza en la práctica al efectuar mediciones electrotécnicas.

También se llama racionalizado, porque su empleo se coordina con la así llamada anotación racionalizada de las leyes fundamentales de la electrotecnia, en la cual se excluye el coeficiente 4π de gran número de ecuaciones y aparece en pocos casos. Por ejemplo, el coeficiente 4π se excluye de la ley de corriente total y de todas sus relaciones derivadas, pero aparece en la ley de Coulomb y en las relaciones que se derivan de ésta (véase a continuación).

Examinemos las relaciones entre algunas unidades de diferentes sistemas:

$$1\text{N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} = \frac{1.000 \text{ g} \cdot 100 \text{ cm}}{1 \text{ seg}^2} = 10^5 \text{ dinas,}$$

o bien,

$$1\text{N} = \frac{10^5}{981.000} \text{ kgf} = 0,102 \text{ kgf.}$$

* En la Norma Soviética se agrega la A para indicar amperio. (N de la Edit.)

$$1\text{J} = 1\text{N} \cdot 1\text{m} = 10^5 \text{ dinas} \cdot 100 \text{ cm} = 10^7 \text{ erg.}$$

$$\text{Puesto que, } 1 \text{ kgm} = \frac{1.000}{427} \text{ calorías,}$$

$$1\text{J} = 1\text{N} \cdot 1\text{m} = 0,102 \text{ kgf} \cdot 1\text{m} = 0,102 \cdot \frac{1.000}{427} = 0,239 \text{ cal.}$$

En la exposición ulterior usaremos el sistema absoluto práctico racionalizado MKSA.

§ 4. Ley de Coulomb

Dos cuerpos electrizados se atraen o repelen entre sí con una fuerza proporcional a la cantidad de carga o a la cantidad de electricidad de estos cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los mismos, si sus propias dimensiones son pequeñas en comparación con la distancia que los separa. Esta relación entre la fuerza de interacción, la magnitud de carga y la distancia entre éstas fue establecida de modo empírico por el físico *Coulomb*. Las investigaciones ulteriores han mostrado que la fuerza de interacción entre las cargas depende también del medio en el cual se encuentran éstas.

Los experimentos llevaron a *Coulomb* a establecer la siguiente ley: dos cargas puntuales q_1 y q_2 , encontrándose en un medio homogéneo con constante dieléctrica ϵ a una distancia r actúan una sobre otra con la fuerza F proporcional al producto de estas cargas e inversamente proporcional al cuadrado de distancia entre éstas. Se llaman cargas puntuales cuando sus dimensiones propias son pequeñas en comparación con la distancia entre ellas. En el sistema absoluto racionalizado MKSA la fórmula de *Coulomb* se anota en la forma siguiente:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon \cdot \epsilon_0 r^2};$$

donde ϵ_0 = constante dieléctrica del vacío; en el sistema MKSA

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \times 10^9} \frac{\text{faradio}}{\text{metro}}$$

ϵ = constante dieléctrica, que muestra en cuántas veces la fuerza de interacción de dos cargas en un medio ambiente es menor que en el vacío, siendo idénticas las demás condiciones. La constante dieléctrica es una magnitud adimensional.

La cantidad de electricidad o la carga eléctrica se mide en el sistema MKSA en culombios. 1 culombio es igual a 3×10^9 unidades absolutas de carga. El valor de la constante dieléctrica del vacío en $\frac{\text{F}}{\text{m}}$ puede ser obtenido de la fórmula de *Coulomb*:

$$[\epsilon_0] = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon F r^2} = \frac{\text{C} \cdot \text{C}}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$$

puesto que $N = \frac{\text{julio}}{\text{m}}$, y un julio = V · culombio, donde V = voltio, tendremos

$$\epsilon_0 = \frac{C \cdot C \cdot m}{V \cdot C \cdot m^2} = \frac{C}{V \cdot m}.$$

Como se mostrará a continuación, culombio/V es un faradio (F), unidad de capacidad. Por eso definitivamente:

$$\epsilon_0 = \frac{F}{m}.$$

La fuerza de interacción de cargas que no se encuentran en el vacío, sino en cualquier otro medio disminuye ϵ veces. A continuación se dan las magnitudes de la constante dieléctrica para algunos materiales que se utilizan en la electrotecnia.

Gasolina	2,3
Papel impregnado de parafina	3,2
Papel impregnado de aceite	3
Agua destilada	81
Aire	1,0006
Keroseno	2
Mármol	8,4
Parafina	2-2,4
Goma	2,5-3,5
Mica	6-8
Vidrio	5-10
Aceite de transformadores	2,2
Ebonita	3,1

Ejemplo. Determinar la fuerza de interacción de dos cargas que se encuentran en el vacío a una distancia de 5 cm una de otra. La magnitud de las cargas es igual a $2 \times 10^{-8}C$ y $3 \times 10^{-5}C$.

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 \cdot r^2} = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}{4\pi \cdot 1 \cdot 0,05^2} = 2,16 \text{ N}$$

puesto que $1 \text{ N} = 102 \text{ gf}$, $F = 2,16 \cdot 102 = 220 \text{ gf}$.

Las mismas cargas, colocadas a la misma distancia en keroseno, actuarán una sobre otra con la fuerza:

$$F = \frac{2 \times 10^{-8} \cdot 3 \times 10^{-5} \cdot 4\pi \cdot 9 \times 10^9}{4\pi \cdot 2 \cdot 0,05^2} = 1,08 \text{ N} = 110 \text{ gf},$$

es decir, la fuerza disminuyó dos veces.

§ 5. Campo eléctrico

La ciencia caracteriza el campo electromagnético como una forma especial de la materia (en otras palabras, como cierta realidad física) que presenta varias propiedades: el campo electromagnético se propaga

ininterrumpidamente en el espacio; en el vacío se propaga con la velocidad de la luz (300.000 km/seg); y posee la propiedad de actuar sobre corrientes y partículas cargadas, durante lo cual la energía del campo se transforma en otras formas de energía (térmica, mecánica, etc.). La partícula cargada dispone de un campo electromagnético, pero el mismo campo puede existir independientemente de la partícula. De ejemplo sirve la partícula (cuanto) luminosa, fotón, y el campo electromagnético que emite una antena.

Supongamos que tenemos un cuerpo conductor cargado e inmóvil. Las cargas eléctricas elementales negativas que son partes de átomos y moléculas de la materia del cuerpo y que forman la carga total del mismo, se encuentran en el interior del cuerpo en movimiento continuo. Pero inclusive a una distancia muy pequeña de la superficie del cuerpo, los campos magnéticos de las partículas positivas y negativas se compensan recíprocamente y, por eso, el campo magnético resultante, alrededor del cuerpo conductor inmóvil cargado, es prácticamente nulo. En cambio, junto a un imán permanente inmóvil se manifiesta sólo el campo magnético, y no hay campo eléctrico. Esto nos permite examinar por separado los campos eléctrico y magnético.

La teoría del campo electromagnético fue expuesta por primera vez por el físico inglés Maxwell en su obra «Tratado sobre la electricidad y el magnetismo» publicada en 1873.

Vamos a considerar el campo eléctrico como una de las partes del campo electromagnético, que se excita por cargas eléctricas y por la variación del campo magnético y que se caracteriza por la fuerza que ejerce sobre partículas que poseen carga eléctrica.

La apreciación de la intensidad del campo eléctrico se efectúa por medio de las fuerzas mecánicas con las que el campo actúa sobre cuerpos cargados. Puesto que, según la ley de Coulomb, la fuerza de acción entre cargas en un medio dado depende de la magnitud de las cargas y de la distancia entre ellas, adoptaremos como medida cuantitativa del campo, la fuerza mecánica con que éste actúa en el punto dado del espacio sobre la unidad de carga positiva, colocada en este punto. Esta magnitud se denomina *intensidad del campo eléctrico* y se designa con la letra *E*.

De acuerdo con la definición, la intensidad del campo es igual a:

$$E = \frac{F}{q}.$$

Igualando a la unidad una de las cargas en la fórmula de Coulomb, obtenemos la expresión para la intensidad del campo *E* en un punto alejado a la distancia *r* de una carga puntual:

$$E = \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot r^2}$$

y para el vacío, en el cual la constante dieléctrica es igual a la unidad,

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Las dimensiones absolutas de la intensidad del campo eléctrico se puede deducir de la fórmula que la determina:

$$[E] = \left[\frac{E}{q} \right] = \frac{N}{C} = \frac{I}{mC} = \frac{C \cdot V}{m \cdot C} = \frac{V}{m},$$

es decir, en el sistema absoluto de unidades la intensidad del campo eléctrico se mide en voltios por metro.

El campo eléctrico cuya intensidad en distintos puntos del espacio es igual en magnitud y en dirección se llama campo homogéneo.

El número total de líneas de fuerza eléctricas que atraviesan una superficie colocada en el campo eléctrico se llama flujo del vector de intensidad a través de esta superficie y se designa con la letra N . A través de la superficie S , ubicada perpendicularmente al vector de intensidad, pasará, en un campo eléctrico homogéneo de intensidad E , un flujo del vector de intensidad N :

$$N = ES.$$

Las dimensiones absolutas del flujo del vector de intensidad:

$$[N] = [ES] = \frac{V}{m} \cdot m^2 = V \cdot m.$$

Si la superficie forma un ángulo α con el vector de intensidad, el flujo del vector de intensidad es igual a:

$$N = ES \cos \alpha = E_i S.$$

En un campo heterogéneo el flujo del vector de intensidad, que pasa a través de una superficie, se determina del modo siguiente: toda la superficie se divide en superficies elementales ΔS , considerando que cada una de éstas se encuentra en un campo homogéneo. Entonces el flujo del vector de intensidad que pasa a través de toda la superficie será:

$$N = \sum E_i \Delta S.$$

Coloquemos la carga q en el centro de una esfera de radio r . La intensidad del campo en la superficie de la esfera será:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}.$$

El flujo del vector de intensidad que pasa a través de toda la superficie de la esfera es:

$$N = \sum E_i \Delta S.$$

Las líneas de fuerza que parten radialmente de la carga serán perpendiculares a la superficie de la esfera en todos los puntos. Teniendo en cuenta que el área de la superficie de la esfera $S = 4\pi r^2$, tenemos:

$$N = \sum E_i \Delta S = E \sum \Delta S = E 4\pi r^2.$$

Reemplazando en la fórmula el valor de E , obtenemos:

$$N = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}.$$

La expresión obtenida se denomina teorema de Gauss.

Es necesario señalar que la superficie cerrada en cuyo interior se coloca la carga eléctrica puede ser de cualquier forma. De este modo, la expresión del flujo del vector de intensidad, que deducimos para la superficie de una esfera, se puede emplear para cualquier otra superficie cerrada.

Al estudiar diferentes fenómenos físicos nos encontramos con magnitudes escalares y vectoriales.

La magnitud escalar se caracteriza sólo por el valor numérico y no tiene dirección. Entre las magnitudes escalares tenemos la temperatura, la cantidad de una substancia, la energía, la potencia, etc.

La magnitud vectorial se caracteriza tanto por el valor numérico, como por la dirección. Se representa por medio de un segmento cuya longitud, en escala determinada, expresa el valor numérico y la flecha indica la dirección.

Entre las magnitudes vectoriales tenemos la fuerza, la velocidad de movimiento, la aceleración, etc. La intensidad del campo eléctrico es también una magnitud vectorial.

En la fig. 6, *a* se muestra gráficamente la intensidad de un campo eléctrico en los puntos *A* y *B*, a las distancias r_1 y r_2 de la carga positiva q colocada en cierto medio. Como se ve en el dibujo, la intensidad del campo de una carga positiva bastante pequeña (puntual) está orientada desde la carga a lo largo del radio. La intensidad del campo en los puntos *A* y *B*, a diferente distancia de la carga q , es distinta y varía, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, a medida que se aleja de la carga q . En la fig. 6, *b* está representada gráficamente la intensidad del campo eléctrico en los puntos *A* y *B*, a las distancias r_1 y r_2 de una carga negativa q que se encuentra en cierto medio. En este caso la intensidad del campo está orientada a lo largo del radio hacia la carga.

Veamos ahora cuál es la intensidad del campo, creada por dos cargas eléctricas $+q_1$ y $-q_2$, en cierto punto *A* (fig. 7). Si quitamos la carga $-q_2$, la intensidad del campo en el punto *A*, creada por la carga $+q_1$, será E_1 . Al contrario, si quitamos la carga $+q_1$, la intensidad del campo en el punto *A*, creada por la carga $-q_2$, será E_2 . Puesto que las intensidades E_1 y E_2 forman un ángulo, para obtener la intensidad resultante del campo E , de la acción conjunta

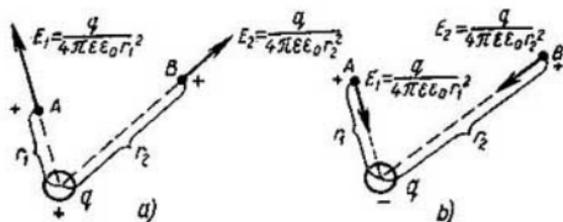


Fig. 6. Intensidad del campo eléctrico en diversos puntos del espacio

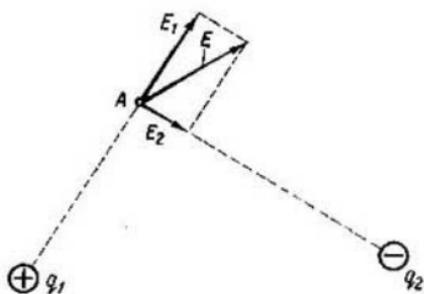


Fig. 7. Determinación de la intensidad de dos cargas puntuales

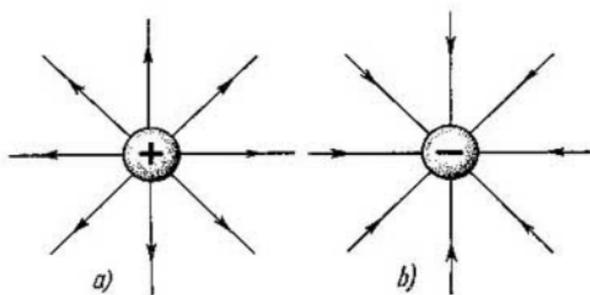


Fig. 8. Líneas de fuerza de una esfera cargada

de las cargas $+q_1$ y $-q_2$, es necesario sumar las intensidades E_1 y E_2 según la regla del paralelogramo. Del mismo modo se puede calcular y trazar la intensidad en cualquier punto del campo, con cualquier número de cargas eléctricas.

Una carga eléctrica positiva, introducida en el campo de un cuerpo de forma esférica cargado positivamente y alejado de otras cargas, se repelerá en una línea recta, que es continuación del radio del cuerpo cargado. Colocando la carga eléctrica en distintos puntos del campo de la esfera cargada y registrando la trayectoria del movimiento de la carga, bajo la acción de sus fuerzas eléctricas, obtendremos varias rectas radiales que parten de la esfera en todas las direcciones. Estas líneas imaginarias por las cuales tiende a moverse la carga positiva, privada de inercia, e introducida en el campo eléctrico, se llaman líneas de fuerza eléctrica *a s*. Es evidente que en un campo eléctrico se puede trazar cualquier número de líneas de fuerza. Por medio de las líneas de fuerza se puede representar gráficamente no sólo la dirección, sino también la magnitud de la intensidad del campo eléctrico en un punto dado. Si convenimos en trazar las líneas de fuerza de modo que a través de un centímetro cuadrado de superficie, perpendicular a éstas en un punto dado, pase una cantidad de las mismas igual a la intensidad del campo en ese punto, nos permitirá juzgar la magnitud de la intensidad en el punto dado del campo, según la densidad de las líneas de fuerza. En la fig. 8, *a* se muestra el campo eléctrico de una esfera cargada positivamente, alejado de otras cargas, y en la fig. 8, *b*, el campo de una esfera cargada negativamente.

Examinemos un campo eléctrico más complejo: entre dos cargas puntuales de diferentes signos (fig. 9, *a*). Tomemos el punto *A* y tracemos para éste el vector de intensidad, teniendo en cuenta la acción simultánea de los dos cuerpos cargados. En el extremo del vector de intensidad E_1 ponemos el punto *B* y trazamos el vector de intensidad en este punto. En el punto *C*, puesto en el extremo del vector de intensidad E_2 , trazamos el vector de intensidad, etc. La línea quebrada *ABCDE* muestra la dirección del campo eléctrico en los puntos *A*, *B*, *C*, *D* y *E*. Si el número de puntos es grande (fig. 9, *b*) la línea quebrada que los une representará con mayor precisión la dirección del campo.

La representación más exacta de la dirección del campo la dará la línea con número infinito de puntos. En este caso la línea quebrada se transformará en una curva uniforme (fig. 9, *c*). La dirección del campo en el punto dado coincide con la dirección de la intensidad en este punto y puede ser indicada por la dirección de la tangente a la línea de fuerza en este mismo punto. En la fig. 10, *a* se representa un campo eléctrico de dos cargas puntuales de signos contrarios, y en la fig. 10, *b*, el de dos cargas de signos iguales.

El campo eléctrico, donde en diferentes puntos los vectores de intensidad son iguales y paralelos, se llama homogéneo.

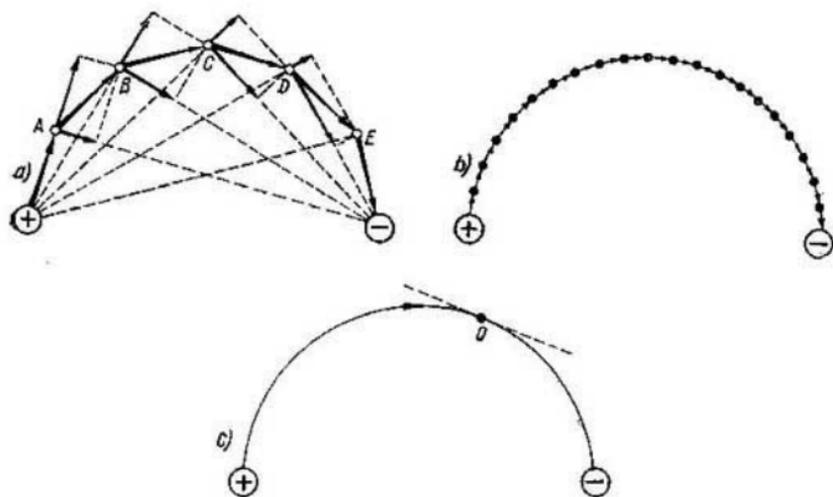


Fig. 9. Dirección del campo en diferentes puntos del espacio

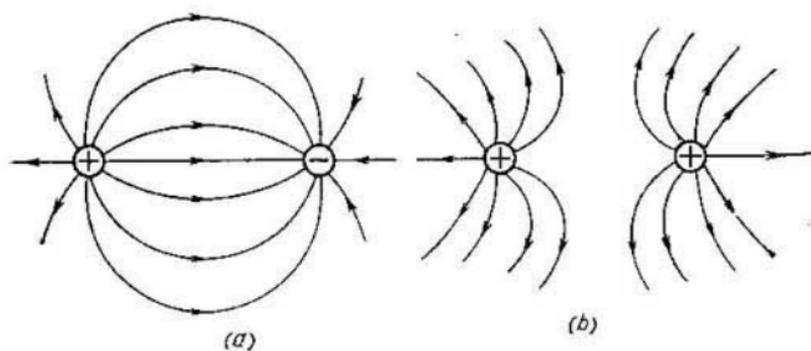


Fig. 10. Campos eléctricos de dos cargas idénticas de signos iguales y contrarios

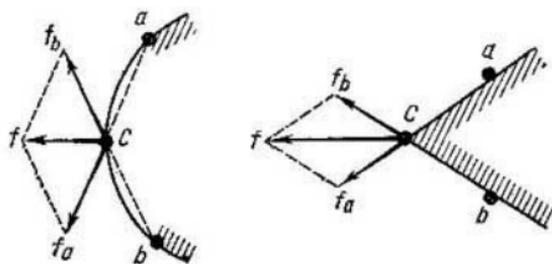


Fig. 11. Acción entre las partes de una carga

El campo eléctrico homogéneo se representa con líneas paralelas dispuestas a distancias iguales una de otra.

Puesto que las cargas de signos iguales se repelen, en todo conductor la carga eléctrica se acumula sólo en su superficie exterior. La cantidad de electricidad que corresponde a la unidad de superficie de un cuerpo cargado se denomina *densidad superficial* de la carga eléctrica. La magnitud de la densidad de una carga eléctrica depende de la cantidad de electricidad en el cuerpo, así como de la forma de la superficie del conductor. En los cuerpos de forma regular (esfera, conductores muy largos de sección circular) la carga eléctrica se distribuye uniformemente. Por eso la densidad superficial de la carga eléctrica será igual en todos los puntos de la superficie de tales cuerpos.

En los conductores de forma irregular la carga no se distribuye uniformemente. La mayor densidad eléctrica estará en las puntas salientes, convexidades; la menor densidad, en cavidades. La densidad eléctrica es particularmente grande sobre las puntas salientes de los objetos. Este fenómeno se explica en la fig. 11, a la izquierda, para un cuerpo de forma regular (esfera), a la derecha, para un cuerpo de forma irregular. Las partes de la carga a y b actúan sobre la parte de la carga C . Las fuerzas de acción entre las partes de la carga f_a y f_b , sumándose geoméricamente, dan la fuerza resultante f ; si las fuerzas f_a y f_b son iguales para ambos ejemplos, la fuerza f será mayor en el segundo caso, ya que el ángulo entre las direcciones de las fuerzas f_a y f_b es menor. Por eso las partes de la carga que se encuentran sobre la punta saliente de un cuerpo de forma irregular experimentarán las fuerzas de repulsión que tratan de alejar estas partes de la carga de la superficie del cuerpo. La parte mayor de la carga, acumulada sobre la punta del conductor, puede formar en este lugar un fuerte campo eléctrico, bajo cuya influencia el aire (u otro aislador) se ioniza, convirtiéndose en conductor. En este caso la carga eléctrica, como dicen, comienza a escapar por la punta. Para evitar este fenómeno en la electrotecnia de altas tensiones, se eliminan minuciosamente los ángulos agudos, extremos y salientes de los conductores.

En el sistema absoluto de unidades MKSA la densidad superficial de la carga se mide en culombios por metro cuadrado.

§ 6. El conductor en el campo eléctrico

Si se introduce un conductor aislado, no cargado, en un campo eléctrico, debido a la acción de las fuerzas eléctricas del campo, en el conductor se verifica la separación de las cargas eléctricas. En la fig. 12 se muestra la esfera metálica A cargada positivamente, en cuyo campo se halla el conductor B . Los electrones libres del conductor se ponen en movimiento en dirección opuesta a la del campo eléctrico. Por eso en el extremo del conductor, orientado

hacia la esfera cargada, surge un exceso de electrones que condiciona la carga negativa de este extremo, mientras que en el otro extremo del conductor faltarán electrones, lo que condiciona la carga positiva de esta parte del conductor.

La separación de las cargas en el conductor, bajo la influencia de un cuerpo cargado se llama *electrización por influencia o inducción electrostática*, y las cargas en el conductor, *cargas inducidas*. A medida que se acerca el conductor *B* a la esfera cargada *A*, la cantidad de cargas inducidas en el conductor aumenta. El campo eléctrico de la esfera cargada *A* cambia tan pronto como en éste aparezca el

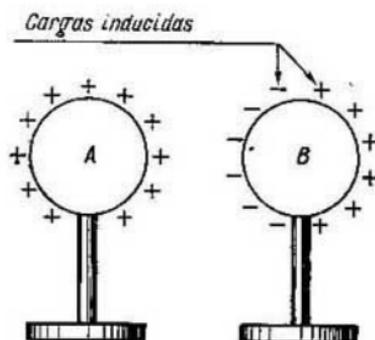


Fig. 12. Inducción electrostática

conductor *B*. Las líneas de fuerza eléctrica de la esfera *A*, que antes partían uniforme y radialmente, ahora se orientan hacia el conductor. Puesto que el principio y el final de las líneas de fuerza eléctrica están formados por las cargas eléctricas que se encuentran en la superficie de los conductores, una línea de fuerza que empieza junto a la superficie con cargas positivas termina junto a la con las negativas. En el interior del conductor no puede existir un campo eléctrico. En caso contrario, entre los diferentes puntos del conductor habría una diferencia de potencial, en el conductor tendría lugar el movimiento de cargas (corriente de conductividad) hasta que, gracias a la redistribución de las cargas, el potencial de todos los puntos del conductor fuera igual.

Este fenómeno se aprovecha cuando se quiere proteger el conductor contra la influencia de campos eléctricos exteriores. Para eso el conductor se rodea por otro, en forma de una superficie metálica continua o de una rejilla de alambre con pequeños orificios. Las cargas inducidas, formadas en el conductor por efecto de la influencia del campo eléctrico, pueden ser separadas una de otra si cortamos el conductor.

El conductor, al hallarse en el campo eléctrico de un cuerpo metálico cargado, a su vez ejerce influencia en la distribución de la

carga en este cuerpo, haciendo acumular la mayor parte de la carga del cuerpo electrizado en la parte dirigida hacia el conductor.

Si el conductor se saca del campo eléctrico, las cargas inducidas en ése desaparecen y el conductor pierde la carga.

§ 7. El dieléctrico en el campo eléctrico

Como se ha indicado más arriba, un dieléctrico se diferencia de un conductor por la ausencia de electrones libres (mejor dicho, por la cantidad relativamente pequeña de electrones libres). Los electrones de los átomos del dieléctrico están fuertemente unidos al núcleo del átomo.

El dieléctrico, introducido en un campo eléctrico, igual que el conductor, se electriza por influencia de las fuerzas de este campo. Pero entre la electrización de un conductor y la de un dieléctrico hay una sustancial diferencia. Si en el conductor los electrones libres se desplazan bajo la influencia del campo eléctrico por todo su volumen, en el dieléctrico las cargas eléctricas no pueden desplazarse libremente. Sin embargo, en los límites de una molécula del dieléctrico, hay un desplazamiento de la carga positiva en dirección del campo eléctrico, y de la carga negativa, en sentido contrario. Bajo la influencia del cuerpo cargado, en la superficie del dieléctrico surgirán cargas eléctricas. Este fenómeno se llama polarización del dieléctrico.

Se distinguen dieléctricos de dos clases. En los dieléctricos de primera clase, la molécula en estado neutro tiene cargas positiva y negativa tan próximas una a otra que su acción se compensa mutuamente. Bajo la influencia del campo eléctrico las cargas positivas y negativas, en los límites de una molécula, se separan un poco una respecto a la otra, formando el dipolo.

En los dieléctricos de segunda clase las moléculas forman dipolos inclusive en caso de ausencia del campo eléctrico. Estos dieléctricos se denominan *p o l a r e s*. Entre éstos están comprendidos el agua, amoníaco, éter, acetona, etc. En tales dieléctricos en caso de ausencia de un campo eléctrico, los dipolos están distribuidos en el espacio, caóticamente, y, por eso, el campo eléctrico resultante que se forma alrededor del dieléctrico polar es igual a cero. Bajo la acción del campo eléctrico exterior, las moléculas (y por consiguiente, también los dipolos) tienden a cambiar de posición, de modo que sus ejes coincidan con la dirección del campo exterior.

A diferencia de las cargas inducidas en el conductor, las cargas polarizadas del dieléctrico no pueden ser separadas una de la otra. Al ser anulado el campo eléctrico, la polarización del dieléctrico desaparece. De este modo, la polarización viene a ser un desplazamiento elástico de cargas eléctricas en la substancia del dieléctrico. Cuando la intensidad del campo eléctrico tiene determinada magnitud, el desplazamiento de las cargas alcanza su límite, pasado

el cual se produce la destrucción —perforación— del dieléctrico, perdiendo éste sus propiedades aislantes y transformándose en conductor de la electricidad. La necesidad de elegir correctamente la magnitud de la intensidad del campo eléctrico en el dieléctrico, ha llevado a la creación de la teoría de rigidez dieléctrica, que tiene gran importancia para la técnica moderna de altas tensiones.

§ 8. Potencial y diferencia de potencial

Supongamos que tenemos un campo eléctrico infinito y uniforme. En el punto M está colocada la carga $+Q$. Bajo la acción de las fuerzas eléctricas del campo, la carga $+Q$, hallándose libre de toda acción exterior, se desplazará en dirección del campo a una distancia infinitamente grande. Para el desplazamiento de la carga se gastará una cierta cantidad de energía del campo eléctrico. Se denomina potencial de un punto dado en un campo eléctrico, al trabajo que gasta el campo eléctrico para desplazar la unidad positiva de la carga desde un punto dado del campo hasta el infinito. Para desplazar de nuevo la carga $+Q$, desde infinito hasta el punto M , las fuerzas exteriores tienen que realizar un trabajo A para superar las fuerzas eléctricas del campo. Entonces para el potencial φ del punto M obtendremos:

$$\varphi = \frac{A}{q} = \frac{1 \text{ julio}}{1 \text{ culombio}} = 1 \text{ voltio,}$$

puesto que un julio = 10^7 ergios, y 1 culombio = 3×10^9 unidades absolutas de carga,

$$\varphi_{\text{práct}} = \frac{10^7}{3 \times 10^9} = \frac{1}{300} \text{ unidad absoluta de potencial.}$$

De este modo, la unidad absoluta electrostática del potencial es mayor que la unidad práctica, voltio, en 300 veces.

Si una carga igual a 1 culombio se desplaza desde el infinito hasta el punto del campo cuyo potencial es igual a 1 voltio, se efectúa un trabajo de 1 julio. Pero si se desplazan desde el infinito, hasta el punto del campo con potencial de 10 V, 15 culombios de electricidad, entonces se efectuará un trabajo de $10 \times 15 = 150$ julios. Matemáticamente esta relación se expresa por medio de la fórmula

$$A = q\varphi \text{ julios.}$$

Para desplazar 10 culombios de electricidad del punto A , con potencial de 20 V, al punto B con potencial de 15 V, el campo eléctrico ha de realizar un trabajo:

$$A = 10 \cdot (20 - 15) = 50 \text{ julios}$$

o bien

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ julios.}$$

La diferencia de potencial entre dos puntos de un campo eléctrico se llama también *tensión*, se mide en voltios y se designa con la letra U .

El trabajo de las fuerzas del campo eléctrico también se puede expresar así:

$$A = qU.$$

Para desplazar la carga q , en dirección de las líneas del campo, desde un punto del campo homogéneo hasta otro, que se encuentra a una distancia l , es necesario realizar un trabajo:

$$A = Fl = Eq l;$$

puesto que

$$A = qU, \text{ entonces } U = El,$$

de donde despejando E

$$E = \frac{U}{l}.$$

Esta es la relación más sencilla entre la intensidad del campo eléctrico y la tensión eléctrica para un campo homogéneo.

La distribución de los puntos con igual potencial en la superficie del conductor cargado, depende de la forma de esta superficie. Si por ejemplo tomamos una esfera metálica cargada, los puntos con igual potencial en el campo eléctrico creado por la esfera, se encontrarán en la superficie esférica que rodea la esfera cargada. La superficie de igual potencial, o como se denomina también la *superficie equipotencial*, es un cómodo procedimiento gráfico para representar un campo. En la fig. 13 se muestra el aspecto de las superficies equipotenciales de una esfera cargada positivamente.

Para representar claramente cómo varía la diferencia de potencial en un campo dado, las superficies equipotenciales se trazan de modo que la diferencia de potencial entre los puntos que se encuentran en dos superficies vecinas sea la misma, por ejemplo, igual a 1 V. Tracemos la superficie equipotencial primaria o nula con un radio cualquiera. Las demás superficies 1, 2, 3, 4 las trazamos de modo que la diferencia de potencial entre los puntos que se encuentran en la superficie dada y en las vecinas, sea de 1 V. De acuerdo con la definición de la superficie equipotencial, la diferencia de potencial entre los diferentes puntos que se encuentran en la misma superficie es igual a cero; por eso la carga se desplaza por la superficie equipotencial sin realizar un trabajo.

En la figura puede verse, que las superficies equipotenciales según se van acercando al cuerpo cargado, se sitúan más próximas unas de otras, ya que el potencial de los puntos del campo aumenta y la diferencia de potencial entre las superficies vecinas, conforme a la condición admitida, permanece igual. Y, al contrario, las superficies equipotenciales, a medida que se alejan del cuerpo car-

gado se sitúan a mayor distancia. Las líneas de fuerza eléctricas son perpendiculares a la superficie equipotencial en cualquier punto, ya que sólo en caso de que la fuerza y el desplazamiento sean perpendiculares, el trabajo de las fuerzas eléctricas durante el movimiento de la carga por la superficie equipotencial puede ser igual a cero. La superficie misma del conductor cargado es equipotencial, es decir, todos los puntos de la superficie del conductor tienen

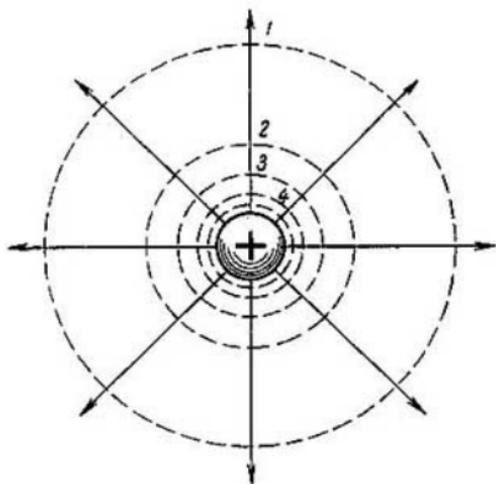


Fig. 13. Superficies equipotenciales (líneas punteadas) y líneas de fuerza (líneas continuas) de una esfera cargada, alejada de otros objetos

igual potencial. Ese mismo potencial es el que tienen todos los puntos en el interior del conductor.

Si tomamos dos conductores con diferentes potenciales y los unimos mediante un alambre metálico, a lo largo del alambre actuará un campo eléctrico, ya que entre los extremos del mismo hay una diferencia de potencial o tensión. Bajo la acción del campo, los electrones libres del alambre se pondrán en movimiento en dirección del potencial decreciente, es decir, por el alambre empezará a fluir una corriente eléctrica. El movimiento de los electrones continuará hasta que los potenciales de los conductores se igualen y la diferencia de potencial entre éstos sea nula.

Si unimos mediante un tubo los fondos de dos recipientes con diferentes niveles de agua, por el tubo fluirá el agua. El movimiento del líquido continuará hasta que los niveles en los recipientes se igualen y no haya diferencia entre los mismos.

Dado que todo conductor cargado conectado a tierra pierde prácticamente toda su carga, el potencial de la tierra se acepta convencionalmente igual a cero.

§ 9. Capacidad eléctrica

La transferencia de una carga eléctrica a un conductor se llama *electrización*. Cuanto mayor es la carga que ha recibido el conductor, tanto mayor es su electrización, o en otras palabras, tanto más alto es su potencial eléctrico.

Entre la cantidad de electricidad y el potencial de un conductor independiente dado existe una función lineal: la relación entre la carga del conductor y su potencial es una magnitud constante:

$$\frac{q}{\varphi} = C.$$

Para cualquier otro conductor la relación entre la carga y el potencial es también una magnitud constante, pero distinta de la del primer conductor.

Una de las causas que influye sobre esta diferencia son las dimensiones del mismo conductor. La misma carga, pero comunicada a diferentes conductores, puede crear distintos potenciales. Para aumentar el potencial de un conductor en una unidad hace falta determinada carga.

La propiedad de los cuerpos conductores de acumular y mantener la carga eléctrica se mide por la relación entre la carga del conductor independiente y su potencial, y se llama *capacidad eléctrica*, o simplemente *capacidad* y tiene el símbolo *C*.

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

La fórmula citada permite establecer la unidad de capacidad:

$$\text{Unidad de capacidad} = \frac{\text{unidad de carga}}{\text{unidad de potencial}}$$

Prácticamente la carga se mide en culombios, el potencial, en voltios, y la capacidad, en faradios.

$$1 \text{ faradio} = \frac{1 \text{ culombio}}{1 \text{ voltio}}.$$

La capacidad de 1 faradio la posee un conductor tal que al comunicarle una carga de 1 culombio, aumenta su potencial en 1 voltio.

La unidad de capacidad, faradio (se designa con *F*), es muy grande. Por lo que generalmente se emplean unidades más pequeñas: el microfaradio (μF), que es la millonésima parte del faradio:

$$1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F},$$

y picofaradio (*pF*), que es la millonésima parte de un microfaradio:

$$1\text{pF} = 10^{-6}\mu\text{F} = 10^{-12}\text{F}.$$

La expresión de la unidad práctica, faradio, en unidades absolutas será:

$$\frac{1C}{1V} = \frac{3 \times 10^9}{1/300} = 9 \times 10^{11} \text{ unid. abs. de capacidad (cm)}$$

El dispositivo destinado para acumular cargas eléctricas se denomina **condensador eléctrico**. El condensador consta de dos placas metálicas (armaduras) separadas por un dieléctrico. Para cargar un condensador es necesario conectar sus armaduras a los polos de una máquina eléctrica. Las cargas de signos contrarios, acumuladas en las armaduras del condensador están unidas por el campo eléctrico. Las placas del condensador colocadas una cerca de la otra, se influyen mutuamente, obteniéndose en éstas una gran carga eléctrica, con una relativamente pequeña diferencia de potencial entre las armaduras. La capacidad de un condensador es la relación entre la carga del condensador y la diferencia de potencial entre sus armaduras:

$$C = \frac{Q}{U} \text{ o } Q = CU.$$

Como muestran las mediciones, la capacidad de un condensador crece, si aumentamos la superficie de las armaduras o las acercamos una a otra. Sobre la capacidad del condensador influye también el material del dieléctrico. Cuanto mayor es la constante dieléctrica o permitividad tanto mayor es la capacidad del condensador, en comparación con la capacidad del condensador cuyo dieléctrico fuera el vacío (aire). Al elegir un dieléctrico hay que tratar de que éste disponga de gran rigidez dieléctrica (buenas cualidades aislantes). Un mal dieléctrico conduce a una descarga disruptiva y el condensador se descargará. Un dieléctrico imperfecto dará lugar a la fuga de la corriente a través del mismo y a la descarga paulatina del condensador.

Las extensas líneas de transmisión de alta tensión se pueden considerar como armaduras peculiares de un condensador. Es necesario considerar la capacidad de un conductor no sólo con respecto a otro conductor, sino también con respecto a la tierra, paredes de edificios y objetos circundantes. Los cables submarinos y subterráneos poseen una capacidad considerable por la disposición próxima de los conductores de corriente entre sí.

Los condensadores, cuyas capacidades no pueden ser variadas, se denominan **condensadores de capacidad constante o fijos**.

Los condensadores de capacidad constante más difundidos actualmente constan de hojas metálicas muy finas con una junta de papel parafinado o de mica entre éstas.

Para aumentar la capacidad (el área de las placas del condensador), se toman con frecuencia varias hojas y se unen en dos grupos

que entran uno en otro, estando separados por un dieléctrico, como se muestra esquemáticamente en la fig. 14. A veces se toman también dos láminas largas, se coloca entre éstas y por fuera un papel parafinado y después todo eso se arrolla en un paquete compacto o en un tubo. Los condensadores de gran capacidad se colocan, frecuentemente, en una caja metálica y se llenan con parafina.

Vamos a determinar la capacidad de un condensador plano. Para esto, tomemos una superficie cerrada arbitraria en torno de una placa del condensador. Entonces, según el teorema de Gauss,

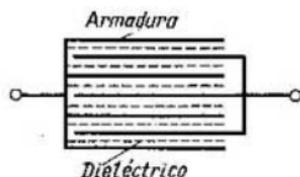


Fig. 14. Esquema de un condensador de capacidad constante

el flujo del vector de intensidad, que pasa a través de cualquier superficie cerrada en cuyo interior se encuentra una carga eléctrica, es igual a:

$$N = ES = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (a)$$

Suponiendo que el campo del condensador es homogéneo (sin tomar en cuenta la alteración del campo junto a los bordes de las placas), obtenemos:

$$E = \frac{U}{d}, \quad (b)$$

donde d - distancia entre las placas o el espesor del dieléctrico. Sustituyendo el valor de E de la fórmula (b) en la fórmula (a), se obtiene:

$$\frac{U}{d} S = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0},$$

de donde

$$q = U \frac{S\epsilon\epsilon_0}{d}.$$

Puesto que

$$C = \frac{q}{U},$$

la expresión de la capacidad de un condensador plano adquiere el aspecto:

$$C = S \frac{\epsilon\epsilon_0}{d},$$

donde S = superficie de las placas en m^2 ;
 d = espesor del dieléctrico en m ;
 ϵ = constante dieléctrica (permitividad).

Así es que para aumentar la capacidad de un condensador plano es necesario aumentar la superficie S de sus placas (armaduras), disminuir la distancia d entre ellas y emplear, en calidad de dieléctrico, un material con mayor constante dieléctrica (ϵ).

Los condensadores, cuya capacidad se puede variar, se denominan condensadores de capacidad variable.

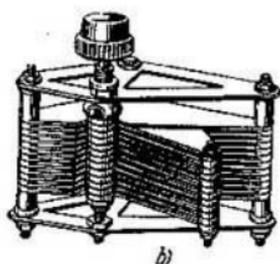
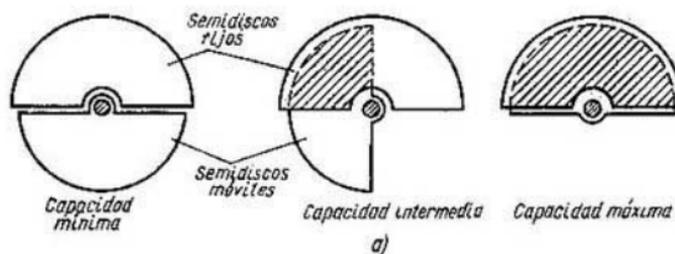


Fig. 15. Condensador de capacidad variable:
a — esquema, b—vista general

El condensador de capacidad variable más sencillo consta de varias (raramente, una) mitades de discos (semidiscos) de cobre o de aluminio fijas y conectadas entre sí eléctricamente. Otro grupo de semejantes mitades de discos está montado sobre un eje común. Al hacer girar el eje, cada una de las mitades de discos fijadas sobre éste se inserta entre dos mitades inmóviles. Haciendo girar el eje y cambiando de tal modo la disposición mutua de las mitades móviles e inmóviles, podemos variar la capacidad del condensador. En la fig. 15, a está representado el esquema de la estructura, y en la fig. 15, b, el aspecto general de un condensador de aire de capacidad variable.

En la radiotecnia se utilizan también condensadores electrolíticos. Estos condensadores se fabrican de dos tipos: líquidos y secos. En ambos tipos de condensadores se emplea aluminio oxidado. Mediante un tratamiento electroquímico especial, en la superficie del aluminio se obtiene una fina película (de algunas decenas de micrones) de óxido de aluminio Al_2O_3 , que forma la así llamada

aislación de óxido de aluminio. La aislación de óxido tiene propiedades electroaislantes, es resistente a la acción mecánica y al calor, pero es higrscópica.

En los condensadores electrolíticos líquidos, la placa de aluminio oxidada se coloca en el interior de un cuerpo metálico que sirve de segunda placa. El cuerpo se llena con electrolito, compuesto de una solución de ácido bórico con algunas sustancias más.

Los condensadores electrolíticos secos se fabrican arrollando tres cintas. Una cinta es una lámina de aluminio oxidada (una

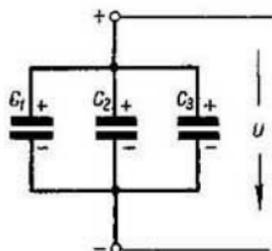


Fig. 16. Conexión en paralelo de condensadores

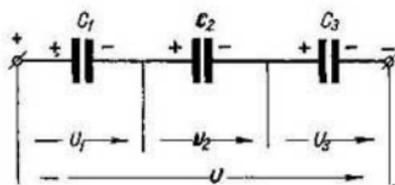


Fig. 17. Conexión en serie de condensadores

hoja fina de metal), otra placa es una cinta de aluminio fina, y, finalmente, entre las dos cintas metálicas se aloja una cinta de papel o de gasa impregnada de electrolito pastoso. Las cintas arrolladas en un modo compacto se colocan en una caja de aluminio y se cubren de betún. La fina película aislante de óxido, con alta constante dieléctrica ($\epsilon = 9$), permite obtener condensadores baratos de gran capacidad específica.

Cuando la capacidad de los condensadores es pequeña, éstos se conectan en paralelo (fig. 16).

Cuando los condensadores se conectan en paralelo, la tensión en las armaduras de cada uno de ellos es la misma. Por eso se puede escribir:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U.$$

La cantidad de electricidad (carga) de cada condensador será:

$$q_1 = C_1 U; \quad q_2 = C_2 U; \quad q_3 = C_3 U.$$

La carga total de la batería de condensadores es:

$$q = q_1 + q_2 + q_3; \\ q = C_1 U + C_2 U + C_3 U = U (C_1 + C_2 + C_3).$$

Designando la capacidad de la batería de condensadores con C , obtenemos:

$$q = CU,$$

entonces,

$$CU = U (C_1 + C_2 + C_3)$$

ó, definitivamente,

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

Por consiguiente, cuando la conexión de condensadores es en paralelo, la capacidad total es igual a la suma de capacidades de cada uno de éstos. Es decir, cada condensador resulta conectado a la tensión completa de la red.

Examinemos ahora la conexión en serie de condensadores (fig. 17).

Si la armadura izquierda del primer condensador está cargada positivamente (+), debido a la inducción electrostática, la armadura derecha del mismo obtendrá la carga negativa (-), que se desplazó de la armadura izquierda del segundo condensador, la cual, a su vez, quedará cargada positivamente, etc. Esto significa que en caso de conectar en serie, cada condensador recibirá la misma carga, independientemente de la magnitud de su capacidad, o sea

$$q_1 = q_2 = q_3 = q.$$

La tensión aplicada a toda la batería de condensadores es igual a la suma de las tensiones en las armaduras de cada condensador:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Puesto que

$$U_1 = \frac{q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{q}{C_2}, \quad U_3 = \frac{q}{C_3},$$

para toda la batería

$$U = \frac{q}{C}.$$

Por lo tanto:

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3};$$

dividiendo por q , obtenemos definitivamente:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

De este modo, cuando la conexión de condensadores es en serie, la magnitud inversa de la capacidad total es igual a la suma de las magnitudes inversas de la capacidad de cada uno de los condensadores. Cada condensador está conectado a una tensión menor que la de la red.

Los condensadores se utilizan ampliamente en la radiotecnica, técnica de rayos X, electrotecnia industrial de alta frecuencia, para aumentar el coeficiente de potencia de las instalaciones eléctricas, etc.

§ 10. Dieléctricos

En la práctica, en las instalaciones eléctricas es necesario aislar las partes conductoras de corriente de las conectadas a tierra, así como aislarlas entre sí. Esto es indispensable para dirigir la corriente, como está previsto en el circuito eléctrico de la instalación.

La técnica utiliza dieléctricos sólidos, líquidos y gaseosos. Los dieléctricos sólidos son: porcelana, mica, goma, vidrio y otros. Como dieléctricos líquidos se emplean el aceite de transformadores, de cables y de condensadores, los líquidos sintéticos: pentaclorodifenilo y otros. Como dieléctrico gaseoso se utiliza, principalmente, el aire.

Una molécula del dieléctrico consta de iones positivos y negativos y de electrones. La cantidad de electrones libres en el dieléctrico es muy pequeña.

En la práctica un dieléctrico no es un aislador absoluto. En estado normal, las cargas elementales de la molécula de un dieléctrico cerca de los centros de equilibrio se encuentran en movimiento térmico, oscilante y desordenado. Si el dieléctrico se conecta a un circuito de corriente continua (condensador), bajo la acción de las fuerzas del campo eléctrico, las cargas elementales de las moléculas del dieléctrico se desplazarán en dirección de las fuerzas que actúan sobre éstas. Como resultado del desplazamiento de las cargas en el interior del dieléctrico, en el circuito surge una corriente temporal que se llama *corriente de polarización*. Pasado un plazo muy breve (10^{-13} — 10^{-15} seg) la corriente de polarización cesa.

Examinemos otra corriente que pueda fluir a través de un dieléctrico durante un tiempo prolongado. En un dieléctrico real siempre hay electrones libres e iones. Por pequeña que sea su cantidad, hay que tomarlos en consideración. Bajo la acción del campo eléctrico, los iones y electrones libres empiezan a desplazarse en el interior del dieléctrico formando la *corriente de fuga*. La magnitud de la corriente de fuga es en algunos casos considerablemente mayor que la magnitud de la corriente de polarización. Al pasar a través de un dieléctrico, la corriente de fuga, conforme a la ley de Joule-Lenz, desprende calor, lo que es necesario tener en cuenta en los cálculos técnicos. Si conectamos un dieléctrico a un circuito de corriente alterna, el proceso de polarización pasará periódicamente tanto en una como en otra dirección y en el circuito surgirá una corriente alterna. Este proceso, el cual se repite ininterrumpidamente, exigirá gasto de energía. El desplazamiento periódico de iones y electrones libres en el material del dieléctrico provocará la corriente de fuga.

Las características principales de un dieléctrico son: 1) la resistividad; 2) la permitividad (constante dieléctrica); 3) el ángulo de pérdidas dieléctricas; 4) la rigidez dieléctrica.

§ 11. Resistividad (resistencia específica)

Más arriba hemos establecido que un dieléctrico técnico no es un aislador absoluto. Por eso, el dieléctrico deja pasar corriente durante el trabajo. La magnitud de esta corriente es muy pequeña en comparación con las que pasan por las partes conductoras de la instalación eléctrica (conductores, barras, cables). La corriente tiene dos vías para su recorrido: a través del espesor del dieléctrico

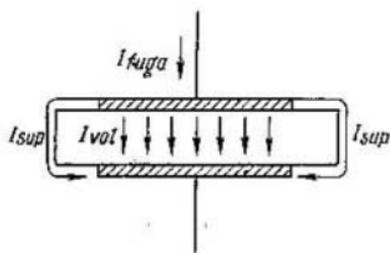


Fig. 18. Corriente de fuga de un dieléctrico

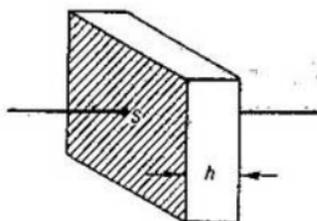


Fig. 19. Resistividad volumétrica de un dieléctrico.

y por su superficie (fig. 18). La corriente total, corriente de fuga I_f , es igual a la suma de corrientes: la que pasa a través del espesor (volumen) del dieléctrico I_{vol} y la que pasa por la superficie del dieléctrico I_{sup} ,

$$I_f = I_{vol} + I_{sup}.$$

Al pasar por las dos vías, la corriente supera la resistividad volumétrica R_{vol} y la resistividad superficial R_{sup} . La resistividad total del aislamiento R_{ais} se determina por:

$$R_{ais} = \frac{U}{I_f}, \quad \text{donde} \quad R_{ais} = \frac{R_{vol} \cdot R_{sup}}{R_{vol} + R_{sup}}.$$

La resistividad de la unidad de volumen se llama resistividad volumétrica y se designa con ρ_U .

Por la unidad de resistividad volumétrica se toma la de un cubo, del material dado, con una arista de 1 cm, si la corriente pasa a través de sus lados opuestos (fig. 19).

La resistividad volumétrica se mide en ohmícentímetros ($ohm \cdot cm$) y se determina por la fórmula

$$R_{vol} = \rho_U \frac{h}{S},$$

donde h = espesor del dieléctrico en cm,
 S = área de la cara lateral en cm^2 .

La resistividad de la unidad de superficie del dieléctrico se llama *resistividad superficial*, se designa con ρ_s y se mide en ohmios.

Como unidad de resistividad superficial se toma la resistencia de un rectángulo (de cualquier dimensión) escogido arbitrariamente en la superficie del material, si la corriente pasa a través de dos lados opuestos de este rectángulo (fig. 20).

La resistividad superficial se determina por la fórmula:

$$R_{sup} = \rho_s \frac{a}{b},$$

donde a = distancia entre los electrodos colocados paralelamente;
 b = espesor de los electrodos.

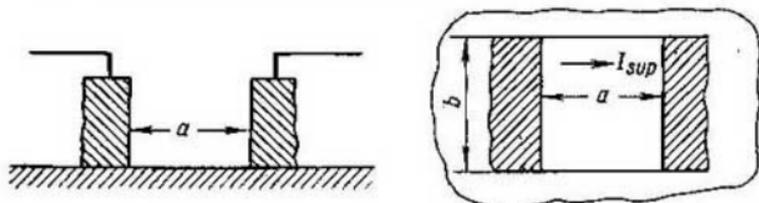


Fig. 20. Resistividad superficial de un dieléctrico

La resistividad del dieléctrico depende del estado de la substancia (sólido, líquido o gaseoso), de la composición del dieléctrico, de la humedad y de la temperatura del medio ambiente.

§ 12. Permitividad (constante dieléctrica)

La permitividad es una magnitud que caracteriza la capacidad del dieléctrico colocado entre las armaduras del condensador. Como es sabido, la capacidad de un condensador plano depende de la magnitud del área de las armaduras (cuanto mayor es el área de las armaduras, tanto mayor es la capacidad), de la distancia entre las armaduras o del espesor del dieléctrico (cuanto más grueso es el dieléctrico, tanto menor es la capacidad), así como del material del dieléctrico para cuya característica sirve la permitividad.

La permitividad es numéricamente igual a la relación entre la capacidad de un condensador con cualquier dieléctrico y la capacidad de un condensador igual, pero con aire como dieléctrico. Para crear condensadores compactos es necesario usar dieléctricos con alta permitividad. La permitividad de la mayoría de los dieléctricos constituye varias unidades.

Se han obtenido dieléctricos para fines técnicos con alta y superalta permitividad. Su parte fundamental es el dióxido de titanio (rutilo).

§ 13. Angulo de pérdidas dieléctricas

En el § 10 hemos analizado ejemplos de conexión de un dieléctrico al circuito de corriente continua y alterna. Resulta que durante el trabajo de un dieléctrico real en el campo eléctrico formado por la corriente alterna, se desprende energía térmica. La potencia que se absorbe en este caso se denomina *pérdidas dieléctricas*. En el § 88 se demostrará que en un dieléctrico ideal la corriente capacitativa adelanta en la fase a la tensión en 90° . En un dieléctrico real la corriente capacitativa adelanta a la tensión en un ángulo menor de 90° . Sobre la disminución del ángulo ejerce influencia la corriente de fuga que se denomina también corriente de conducción. La diferencia entre 90° y el ángulo de desfase (entre la tensión y la corriente que pasa en el circuito con dieléctrico real) se llama *ángulo de pérdidas dieléctricas* o *ángulo de pérdidas* y se designa con δ (delta). Más a menudo se determina no el ángulo δ , sino la tangente del mismo, $\operatorname{tg} \delta$.

Las pérdidas dieléctricas son proporcionales al cuadrado de la tensión, a la frecuencia de la corriente alterna, a la capacidad del condensador y a la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas.

Por consiguiente, cuanto mayor es $\operatorname{tg} \delta$, tanto mayores serán las pérdidas de energía en el dieléctrico, y tanto peor es el material del dieléctrico. Los materiales con $\operatorname{tg} \delta$ relativamente grande (de 0,08 a 0,1 y más) son malos aisladores. Los materiales con $\operatorname{tg} \delta$ relativamente pequeño (cerca de 0,0001) son buenos aisladores.

§ 14. Rigidez dieléctrica

La rigidez dieléctrica es una de las cualidades principales de los materiales aislantes. La intensidad del campo eléctrico, dentro de cuyos límites puede trabajar normalmente el material aislante, no debe superar un valor bien determinado. A cierto valor de la intensidad tiene lugar la alteración del funcionamiento del dieléctrico, su material es perforado por una chispa que se transforma en un arco. El dieléctrico pierde sus propiedades aislantes, su resistencia decae bruscamente y las partes conductoras que estaban separadas antes por un cuerpo aislante se ponen en cortocircuito. Tiene lugar la perforación del dieléctrico. La tensión que ocasiona la perforación se llama *tensión disruptiva* U_{dtsr} ; la magnitud correspondiente de la intensidad del campo, intensidad disruptiva E_{dtsr} o rigidez disruptiva (rigidez dieléctrica):

$$E_{dtsr} = \frac{U}{h} \frac{\text{kV}}{\text{cm}}, \text{ o bien, } \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$$

donde h es el espesor del dieléctrico.

Está absolutamente claro que, en su aplicación práctica, el material aislante no debe encontrarse bajo una tensión que pueda provocar la perforación del dieléctrico.

Se distinguen dos tipos de perforación de un dieléctrico sólido: eléctrica y térmica. La perforación eléctrica consiste en la destrucción de la estructura de la substancia bajo la acción de las fuerzas del campo eléctrico. En un campo eléctrico débil las cargas eléctricas de la molécula se desplazan de modo elástico, originando la polarización del dieléctrico. Pero si la intensidad del campo alcanza la magnitud de la disruptiva, las partículas cargadas saltan de las posiciones iniciales, lo que conduce a la perforación.

Ahora examinemos el fenómeno de la perforación térmica.

Como es sabido, hallándose un dieléctrico en un campo eléctrico alterno se desprende calor a cuenta de las pérdidas eléctricas. Siendo negativo el coeficiente de temperatura de la resistencia, el calentamiento del material irá acompañado de la disminución de la resistencia del dieléctrico. Esto traerá un aumento de la corriente que pasa por el dieléctrico y al calentamiento aún mayor del material. De este modo el proceso de calentamiento va creciendo cada vez más hasta que el material se destruya (se funde, se carboniza, etc.).

La perforación de los dieléctricos gaseosos (aire) es provocada por la formación y el movimiento de iones en el medio gaseoso, siendo altas las magnitudes de la intensidad del campo eléctrico. En cierto momento, el movimiento rápido de los iones conduce a que éstos choquen contra moléculas neutras del gas y a que se formen nuevos iones. Este fenómeno va acompañado de un aumento brusco de la cantidad de iones en el gas, debido a lo cual la resistencia del gas disminuye (ionización por choque) y tiene lugar la perforación del dieléctrico gaseoso.

En un campo eléctrico heterogéneo (entre dos puntas salientes, una punta y un plano, entre cables de líneas de alto voltaje, etc.), en los lugares donde la intensidad del campo alcanza valores críticos, surge una descarga oscura (sin chispas) que va acompañada por un zumbido o chasquido con formación de luminiscencia violeta (efecto corona). A aumentar la tensión, la descarga oscura puede convertirse en chispa, después en descarga de penacho y, por fin, en un arco (si la potencia de la fuente de tensión es grande). La perforación del aire junto a la superficie de un dieléctrico sólido se llama *descarga superficial* (recubrimiento). Para aumentar el área de las piezas aislantes, éstas se hacen onduladas.

La humedad, los gases, impurezas mecánicas y químicas ejercen gran influencia sobre la rigidez disruptiva de los dieléctricos líquidos. La perforación de los dieléctricos líquidos es causada por el calentamiento excesivo del líquido y la destrucción de sus moléculas.

§ 15. Principales materiales aislantes

El *asbesto* es un mineral que tiene una estructura fibrosa. La longitud de la fibra alcanza desde décimas de milímetro hasta varios centímetros. De asbesto se fabrica hilado, cintas, tejidos,

papel, cartón y otros artículos. La propiedad más preciada del asbesto consiste en su alta resistencia al calor. Al calentarlo hasta 300-400°C sus propiedades no cambian. Gracias a la baja conductividad térmica, el asbesto se utiliza como aislamiento térmico para altas temperaturas. El asbesto es higroscópico, cualidad que disminuye al impregnarlo con resinas, compuestos bituminosos, etc. La fibra de asbesto impregnada de compuestos bituminosos y pegada al conductor con barniz forma un aislamiento de asbesto delta. El asbesto se emplea en los plásticos como carga o relleno. Las propiedades electroaislantes del asbesto no son altas. Su rigidez dieléctrica es de 0,6 a 1,2 kV/mm. Por eso no se emplea para altas tensiones.

El **f i b r o c e m e n t o** es una masa plástica prensada en frío. La fibra de asbesto es el relleno y el cemento la sustancia aglutinante. El fibrocemento se usa para fabricar tableros, cuadros, bases de aparatos, tubos, etc. Tiene buenas propiedades mecánicas, alta resistencia al arco, resistencia al calor y es incombustible. Las propiedades electroaislantes del fibrocemento son bajas. Impregnado de parafina derretida, aceite de linaza, compuestos bituminosos y otras sustancias disminuye su cualidad higroscópica.

La **b a q u e l i t a** es una resina artificial que se obtiene por la reacción del fenol con formol, por lo cual estas resinas reciben el nombre de resinas de formaldehído. La masa obtenida se denomina baquelita A. La temperatura necesaria para ablandar la baquelita A es de unos 80°C. Se disuelve en alcohol y acetona. La baquelita A al ser calentada hasta 110-140°C se convierte en baquelita C que es infusible e insoluble. La baquelita se usa para impregnar madera y otros materiales, fabricar plásticos (guetinax, textolita), pegar madera contrachapada. La rigidez dieléctrica de la baquelita es de 10 a 20 kV/mm; $\epsilon = 4,5 - 6$.

El **p a p e l** se fabrica mediante un tratamiento especial, a base de álcalis, de la albura de las coníferas. En la electrotecnia se utilizan los siguientes tipos de papel aislante: de condensador, de cable, impregnable (para fabricar guetinax de chapa), de devanado (para fabricar cilindros de papel y baquelita), de cinta de mica (para fabricar el aislamiento de mica engomada), de pegar (con el fin de aislar las chapas de acero electrotécnico).

El **g a l o v a x** se obtiene mediante la cloración de la naftalina. La temperatura de fusión del galovax es de 95 a 135°C. Gracias a su alta constante dieléctrica (cerca de 5), el galovax se usa para impregnar los condensadores de papel. A diferencia de la parafina y cerecina, el galovax es incombustible.

El **g u e t i n a x** se fabrica de papel impregnado de baquelita. Las hojas de papel se prensan, calentándolas al mismo tiempo hasta 160-165°C, debido a lo cual la baquelita A se convierte en baquelita C. De este modo se obtienen chapas de guetinax de 0,5 a 50 mm de espesor. El guetinax se somete bien al tratamiento mecánico: taladrado, torneado, fresado, aserrado. El guetinax de 2,5 a 3 mm de

espesor, se puede estampar. Bajo la acción del arco eléctrico su superficie brillante se carboniza y se transforma en conductor de la electricidad. El guetinax se emplea para fabricar tableros, cuadros, juntas, armazones de aislación en los transformadores. La rigidez dieléctrica del guetinax es de 20 a 25 kV/mm; $\epsilon = 5 - 6$.

La **m a d e r a** es un material fibroso, orgánico, natural. Se emplea para fabricar piezas aislantes de poca importancia. Se usan generalmente especies foliáceas duras: abedul, roble, haya, arce. Para aumentar la rigidez dieléctrica de la madera, ésta se impregna con parafina, aceite de linaza, resinas. En la electrotecnia, la madera se utiliza para piezas de apoyo y sujeción de los transformadores, cuñas de ranura en las máquinas eléctricas, postes de las líneas de comunicación y de transmisión eléctrica, etc.

La **c o l o f o n i a** es una resina frágil de color amarillo claro o marrón obtenida mediante el tratamiento de la brea de coníferas (pino). La colofonia se disuelve en los aceites de petróleo, hidrocarburos líquidos, aceites vegetales, alcohol y trementina. La temperatura necesaria para ablandar la colofonia es de 50 a 70°C. Su rigidez dieléctrica es de 10 a 15 kV/mm. La colofonia se usa para producir masas de impregnación y de relleno.

El **c a r t ó n e l e c t r o t é c n i c o** difiere del papel por su mayor espesor. Se fabrican dos tipos de cartón: ЭВ, para el trabajo al aire, y ЭМ para el trabajo en el aceite. El cartón se utiliza para fabricar piezas menudas. La rigidez dieléctrica del cartón es de 8 a 10 kV/mm; $\epsilon = 2,5 - 4$.

El **c a u c h o** (goma) se obtiene de la savia de las plantas del mismo nombre. Ese caucho se llama natural. El caucho se puede obtener también de modo artificial. El caucho artificial o sintético se produce a partir del alcohol o de derivados de petróleo. El caucho calentado hasta 50°C se ablanda y se hace pegajoso; a baja temperatura es frágil. El caucho se disuelve bien en el sulfuro de carbono e hidrocarburos.

Para aumentar la resistencia mecánica al calor y al frío, así como la resistencia a los disolventes, se añade al caucho de 3 a 10% de azufre. Este proceso se denomina **v u l c a n i z a c i ó n**, proceso mediante el cual se obtiene la goma. En la electrotecnia la goma se utiliza para aislar los conductores y cables de instalación y montaje de algunas construcciones, para tubos aislantes, guantes, chanclos y alfombras protectores, etc. La goma posee altas propiedades aislantes, es resistente a la humedad, impermeable al agua y gases; tiene pequeña resistencia al calor (al calentarla más de 60—75°C se hace frágil y se agrieta); cuando sobre la goma actúan aceites del petróleo, aumenta de volumen y se descompone bajo la acción de la luz. La rigidez dieléctrica de la goma es de 24 kV/mm; $\epsilon = 2,5 - 3$.

Los **b a r n i c e s a i s l a n t e s** son soluciones de substancias que solidifican (resinas, compuestos bituminosos, aceite secante, etc.) en disolventes volátiles (gasolina, benceno, alcoholes, éteres, ace-

tona, trementina, etc.). Los barnices aislantes se dividen en tres grupos: impregnadores, recubridores y adhesivos. Los barnices impregnadores sirven para impregnar una aislación porosa, fibrosa o dura (papel, cartón, hilaza, tejidos, aislación de los devanados de máquinas e instrumentos eléctricos). Los barnices recubridores sirven para formar sobre la superficie de los objetos una película sólida e impermeable. Con barnices adhesivos se pegan hojas de mica. Según el régimen de secado, los barnices se dividen en: barnices de secado en caliente (en hornos) y de secado en frío (al aire).

Los tejidos barnizados se fabrican de tejidos de algodón, seda o vidrio, impregnados después de barniz al aceite o en barniz oleobituminoso. Los tejidos barnizados se usan para la aislación de los devanados de las máquinas y aparatos. Los tejidos de algodón barnizados tienen un espesor de 0,15 a 0,25 mm y rigidez dieléctrica de 35 a 40 kV/mm. Los tejidos de seda barnizados tienen un espesor de 0,05 a 0,1 mm y una rigidez dieléctrica elevada (1,5 ó 2 veces mayor que la de los de algodón barnizado).

El aceite de transformadores se obtiene por medio de la destilación fraccionada del petróleo. El aceite de transformadores se emplea en los aparatos eléctricos para asegurar una buena aislación. En los transformadores de fuerza es también el medio refrigerador. En los interruptores de aceite se usa en calidad de medio extintor de arcos. El aceite de transformadores se utiliza también para el rellenado de bornes de alto voltaje y como componente de diferentes masas de relleno. Los aceites de petróleo se usan, después de una purificación especial, en los condensadores y la producción de cables. La propiedad más importante del aceite de transformadores, como material aislante, es su rigidez dieléctrica que es de 5 a 18 kV/mm; $\epsilon = 2,2$.

El mármol es una piedra caliza de grano cristalino. Los bloques de mármol se sierran en losas que después se fresan y pulen. Los defectos del mármol son: higroscopicidad, fragilidad, agrietamiento a altas temperaturas y descomposición al ser atacado por los ácidos. Al impregnarse con parafina, bituminosos o colofonia, el mármol prácticamente deja de ser higroscópico. La rigidez dieléctrica del mármol es de 2,5 a 3,5 kV/mm; $\epsilon = 8$.

La parafina es una sustancia cerosa obtenida del petróleo. La parafina bien purificada es una sustancia cristalina de color blanco. La parafina se utiliza para impregnar madera, papel, sustancias fibrosas, para rellenar las bobinas de alta frecuencia y transformadores y para preparar aislamientos. La parafina es insoluble en el agua y alcohol, pero se disuelve en los hidrocarburos líquidos: aceites del petróleo, gasolina, benceno. El peso específico de la parafina es de 0,85 a 0,9; la temperatura de fusión es de 50 a 55°C; la rigidez dieléctrica, de 16 a 30 kV/mm; $\epsilon = 2,1 - 2,2$.

Los plásticos se componen de una sustancia aglutinante (rerina, compuestos bituminosos y otras) y de una carga o relleno

(«harina de piedra», «aserrín», fibra de algodón, de asbesto o de vidrio, mica, papel, telas, etc.). Además, los plásticos incluyen los plastificantes —substancias que disminuyen la fragilidad— y colorantes que dan al artículo el color requerido. La substancia aglutinante mezclada con el relleno se coloca en un molde y por medio de presión y calor (a veces, sólo por medio de presión) se obtiene la pieza de dimensiones y configuración necesarias. Los plásticos se emplean como aislamiento, así como materiales de construcción.

Los compuestos de impregnación y de relleno (compound) se emplean para impregnar y rellenar diferentes partes de instalaciones eléctricas. Estas composiciones aíslan las partes conductoras de corriente, crean una aislación resistente al agua y mejoran las condiciones de refrigeración. Los compuestos de impregnación y de relleno se fabrican de betunes del petróleo y de mezclas de aceite mineral con colofonia. A veces, para aumentar la conductividad térmica, se añade a los betunes un relleno, por ejemplo, arena de cuarzo.

La mica es un mineral de estructura cristalina. Gracias a su estructura, la mica se desintegra fácilmente en hojuelas aisladas. Tiene una alta rigidez dieléctrica (de 80 a 200 kV/mm), alta resistencia mecánica al calor y a la humedad, y flexibilidad. En la electrotecnia se utilizan dos clases de mica: la moscovita y la flogopita, que se distinguen por su composición, color y propiedades. La mejor mica es la moscovita. De las hojas de mica se estampan láminas rectangulares para los condensadores, arandelas para aparatos eléctricos, etc. Pero más a menudo las hojas de mica se pegan entre sí mediante barnices adhesivos (gliptales, aceite de betún, de goma laca, etc.). El material obtenido se llama micanita. Se distinguen las siguientes micanitas: de colector (para aislar las delgas de colector), de juntas (para aislar las arandelas, juntas), de molde (se prensa al calor para fabricar piezas de perfil), elástica (para aislar las espiras entre sí y las ranuras de las máquinas eléctricas), refractaria (para instrumentos eléctricos de calefacción). A veces las láminas de mica se pegan a papel o a tejidos (cinta de papel de mica, mica-folio, micafolio de vidrio).

El vidrio se obtiene fundiendo la sílice SiO_2 (arena) con óxidos de diferentes metales: sodio, potasio, plomo, calcio. El vidrio es un cuerpo amorfo, por eso, no tiene una temperatura determinada de fusión. El vidrio se ablanda y se funde al calentarlo. En estado líquido se puede soplar, estirar, prensar, moldear. Las propiedades físicas y mecánicas del vidrio dependen de su composición y de la elaboración. Si el vidrio corriente es frágil, el vidrio bien templado dispone de alta resistencia al impacto. El vidrio es prácticamente impermeable, no se corroe por los ácidos (excepto el ácido fluorhídrico), ni por los álcalis. Pero los vidrios que contienen sólo óxidos alcalinos (Na_2O , K_2O) se disuelven bien en el agua (vidrio líquido). Las propiedades aislantes del vidrio son muy altas. Al calentar el

vidrio, éste pierde rápidamente sus cualidades aislantes. En la electrotecnia se emplea para fabricar lámparas de alumbrado y válvulas electrónicas, aisladores, etc. Del vidrio se puede obtener fibra de 0,005 a 0,006 mm de diámetro. Las fibras se tuercen en hilos. Los hilos de vidrio (fibra de vidrio) se utilizan para obtener una aislación resistente al calor de los conductores marca «ИЦД». La rigidez dieléctrica del vidrio es de 10 a 40 kV/mm; $\epsilon = 5,5 - 10$.

La **t e x t o l i t a** es un plástico, en forma de tejido de múltiples capas, impregnado de resina de resol y prensado a alta presión y 150°C. En comparación con el guetinax, la textolita ofrece las siguientes ventajas: menor fragilidad, alta propiedad mecánica y resistencia al desgaste. Sus desventajas son: peores propiedades eléctricas, menor resistencia a la humedad y mayor precio (5 ó 6 veces más caro que el guetinax). La textolita fabricada a base de fibra de vidrio se denomina textolita de vidrio. Esta posee altas propiedades eléctricas, es resistente a la humedad, al calor y presenta gran resistencia mecánica. La textolita se somete fácilmente al mecanizado en máquinas herramienta. Se emplea para fabricar rodillos, ruedas dentadas silenciosas, casquillos para cojinetes, etc. La rigidez dieléctrica de la textolita es de 27 a 45 kV/mm.

La **p o r c e l a n a e l e c t r o t é c n i c a** es el material cerámico aislante más difundido. La porcelana se compone de caolín («arcilla blanca»), arcilla refractaria, cuarzo y feldespato. La fabricación de artículos de porcelana consta de las siguientes operaciones: triturado de las partes componentes de la porcelana y su mezcla con agua hasta obtener una masa homogénea. Por medio del prensado, torneado, fundición en moldes de yeso y extrusión, se obtienen artículos de la configuración necesaria. Para evaporar el exceso de agua los artículos se secan, después se cubren con una masa vítrea (vidriado), que disminuye la higroscopicidad de la porcelana, da a las piezas un color determinado y crea, durante el recocido, una superficie lisa y uniforme. Después del vidriado, los artículos se secan de nuevo y se recuecen en hornos a 1.320—1.450°C. La porcelana se caracteriza por su alta resistencia al calor, a los arcos eléctricos y una absorción de agua (higroscopicidad) bastante pequeña. De porcelana se fabrican aisladores para las líneas de transmisión (de suspensión y de clavija), de centrales eléctricas (de apoyo y de paso), de aparatos; artículos de porcelana para instalación eléctrica (rodillos, piezas de los fusibles, portalámparas, enchufes, etc.). La rigidez dieléctrica de la porcelana es de 6 a 10 kV/mm; $\epsilon = 5 - 6,5$. Además de la porcelana, se utiliza otro material cerámico, la **e s t e a t i t a**, preparada a base del talco. En comparación con la porcelana la esteatita posee más altas propiedades de aislamiento, físicas y químicas.

La **f i b r a v u l c a n i z a d a** se fabrica de papel poroso tratado con solución de cloruro de zinc. La fibra se somete bien al mecanizado. Un gran defecto de esta fibra es su higroscopicidad.

Se corroe por los ácidos y álcalis. De la fibra vulcanizada se hacen piezas menudas, juntas y armazones para bobinas. La rigidez dieléctrica de la fibra es de 5 a 11 kV/mm; $\epsilon = 2,5 - 5$. La fibra fina (de 0,1 a 0,5 mm) se denomina fibro-cuero.

La **ceresina** se obtiene mediante la refinación del mineral ceroso ozoquerita y petrolato. En comparación con la parafina, la ceresina tiene una temperatura de fundición más alta (65—80°C) y una resistencia elevada a la oxidación. La ceresina se utiliza para impregnar los condensadores de papel, preparar composiciones aislantes, etc. La rigidez dieléctrica de la ceresina es de 15 kV/mm.

La **seda** se obtiene del capullo de los gusanos de seda. El espesor de un hilo es de 0,01 a 0,015 mm. Los hilos de seda se emplean para aislar los conductores y fabricar tejidos.

La **goma laca** es una resina natural de ciertas plantas, su temperatura de fusión es de 100 a 200°C. La goma laca tiene el aspecto de escamas amarillas o marrones; se disuelve fácilmente en el alcohol. La goma laca se utiliza para hacer masas de relleno, lacas aislantes y adhesivas y para impregnar cintas aislantes; $\epsilon = 2,7 - 3,7$.

El **esquistos** es una pizarra de estructura laminar. No es higroscópico; se somete fácilmente al mecanizado. Se utiliza para fabricar paneles, tableros para interruptores de cuchilla, etc. La rigidez dieléctrica del esquistos es de 1,5 a 3 kV/mm; $\epsilon = 6 - 7,5$.

La **ebonita** (goma endurecida) se obtiene del caucho, añadiendo 20—25% de azufre. La ebonita se fabrica en forma de chapas, barras y tubos; se somete fácilmente al mecanizado. Se usa en la técnica de bajas tensiones. Los tubos de ebonita sirven para aislar los conductores en su paso a través de las paredes y en caso de tendido oculto.

Problemas

1. Dos cargas eléctricas de $5 \times 10^{-8}\text{C}$ y $3 \times 10^{-4}\text{C}$ se encuentran a la distancia de 10 cm una de la otra. Determinar la fuerza de interacción entre las cargas.
2. Dos cargas eléctricas de 40 unidades CGS electrostáticas y 25 unidades CGS electrostáticas se encuentran a la distancia de 5 cm en el aceite de transformadores. Determinar la fuerza de interacción entre las cargas.
3. Sobre la carga de $2 \times 10^{-7}\text{C}$ actúa la fuerza de 0,1 N. Determinar la distancia a la cual se encuentra la segunda carga de $4,5 \times 10^{-7}\text{C}$. Ambas cargas se encuentran en vacío.
4. Determinar la intensidad del campo eléctrico de una carga de $2 \times 10^{-8}\text{C}$ en el vacío a la distancia de 20 cm.
5. Determinar la carga que crea en el vacío la intensidad del campo eléctrico, igual a 40 V/cm, y a la distancia de 30 cm.
6. Determinar el potencial en un punto del campo eléctrico, si para trasladar a este punto la carga de $5 \times 10^{-7}\text{C}$ fue gastado 0,05 J de trabajo.
7. El potencial del punto A es de 50 V; del punto B, 80 V. Determinar el trabajo que hace falta realizar para trasladar una carga de 5 C del punto A al punto B.
8. Determinar la capacidad del conductor, si se le comunica una carga de $2 \times 10^{-3}\text{C}$, y el potencial del conductor aumenta en 500 V.

9. Determinar la capacidad de un condensador plano, si el área de sus armaduras es de 40 cm^2 . El dieléctrico del condensador es papel de $0,1 \text{ mm}$ de espesor, impregnado de parafina.

Preguntas de control

1. ¿Cuál es la estructura de un átomo de sustancia desde el punto de vista de la teoría electrónica?
2. ¿Qué es un conductor y un aislador? Cítense ejemplos.
3. ¿Qué expresa la ley de Coulomb? ¿Para qué sirve la fórmula de Coulomb?
4. ¿Qué es el campo eléctrico?
5. ¿Qué es la intensidad del campo eléctrico?
6. ¿Cómo se puede determinar gráficamente la intensidad del campo eléctrico creado por varias cargas eléctricas puntuales?
7. ¿Cómo se distribuyen las partes de una carga eléctrica sobre la superficie de los conductores de diferente forma?
8. ¿Qué pasa con un conductor, si lo introducimos en un campo eléctrico?
9. ¿Qué pasa con un dieléctrico, si lo introducimos en un campo eléctrico?
10. ¿Qué es el potencial eléctrico? ¿En qué unidades se mide? ¿Cómo se determina?
11. ¿Cómo determinar el trabajo necesario para transferir la carga de un punto del campo eléctrico al otro?
12. ¿Qué es la capacidad eléctrica? ¿En qué unidades se mide?
13. ¿Cuál es la estructura de los condensadores eléctricos y para qué sirven?

LEYES FUNDAMENTALES DE LA CORRIENTE CONTINUA

§ 16. Nociones acerca de la corriente eléctrica

Carguemos dos esferas metálicas, colocadas sobre unos soportes (fig. 21); la esfera *A* con electricidad positiva y la otra *B*, con electricidad negativa. Si unimos las esferas con un conductor, el exceso de electrones de la esfera *B* pasará por el alambre a la esfera *A*, donde

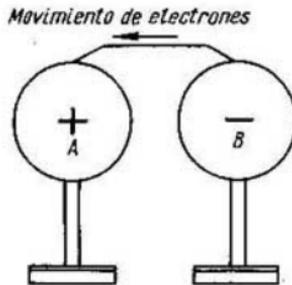


Fig. 21. Movimiento de electrones por un conductor

hay menor cantidad de electrones. Este movimiento de electrones por el conductor es lo que se llama corriente eléctrica *. Los electrones en su movimiento no recorren libremente toda la longitud del conductor. Por el contrario, los electrones recorren distancias muy pequeñas hasta que chocan contra otros electrones, átomos o moléculas. Estas distancias se llaman longitud de recorrido libre de los electrones.

Para tener una corriente ininterrumpida sería preciso que la esfera *A* se cargase ininterrumpidamente con electricidad positiva y la esfera *B*, con electricidad negativa.

* En electrotecnia se considera convencionalmente que el sentido de la corriente es opuesto al del movimiento de los electrones en el conductor. En otras palabras, se considera convencionalmente que el sentido de la corriente coincide con el del movimiento de las cargas positivas.

En la práctica, la corriente eléctrica se obtiene de fuentes especiales: pilas eléctricas, acumuladores y generadores.

La corriente eléctrica no puede observarse directamente. Este fenómeno puede ser observado solamente por los efectos que produce la corriente. Sobre la acción de la corriente eléctrica se tratará detalladamente en los párrafos correspondientes de la presente obra. Ahora señalaremos los siguientes efectos por medio de los cuales se puede determinar fácilmente la presencia de la corriente:

1) la corriente, fluyendo a través de soluciones de sales, álcalis, ácidos, así como a través de las sales fundidas, las descompone químicamente en sus componentes;

2) el conductor, por el cual fluye la corriente eléctrica se calienta;

3) alrededor del conductor por el cual pasa la corriente eléctrica, se crea un campo magnético.

§ 17. Circuito eléctrico y sus elementos

El más elemental dispositivo eléctrico consta de una fuente de tensión (pila eléctrica, acumulador, generador, etc.), consumidores o receptores de energía eléctrica (lámparas de incandescencia, aparatos

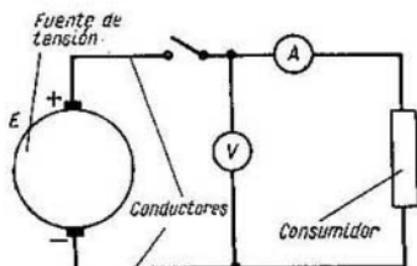


Fig. 22. Esquema de un circuito eléctrico

eléctricos térmicos, motores eléctricos, etc.) y los conductores que unen los bornes de la fuente de tensión con los del consumidor.

La fuente de tensión proporciona la energía eléctrica que el consumidor transforma en otras formas de energía: luz, calor, movimiento, etc. El conjunto de la fuente de energía eléctrica, sus consumidores y los conductores que los unen (la línea de transmisión) se denomina circuito eléctrico (fig. 22). El circuito eléctrico tiene dos partes: interior y exterior. La fuente de tensión pertenece a la parte interior del circuito. Los conductores de unión, consumidores, interruptores de diferentes clases, instrumentos eléctricos de medición, es decir, todo lo que se conecta con los bornes de la fuente de tensión forma parte del exterior del circuito.

La corriente continua puede circular solamente por un circuito eléctrico cerrado. La ruptura del circuito en cualquier lugar provoca la interrupción de la corriente eléctrica.

§ 18. Intensidad y densidad de la corriente

Si a través de una sección de un conductor fluyen Q culombios de electricidad durante t segundos, la cantidad de electricidad que pasa a través de la sección del conductor durante un segundo se llama intensidad de la corriente y se designa con la letra I .

$$I = \frac{Q}{t}.$$

La unidad de intensidad es el amperio, y es igual a la cantidad de electricidad de un culombio que ha pasado por la sección del conductor en un segundo, es decir

$$1 \text{ amperio} = \frac{1 \text{ culombio}}{1 \text{ seg}}.$$

La corriente en el circuito se mide con el amperímetro, cuyo aspecto exterior se da en la fig. 23.

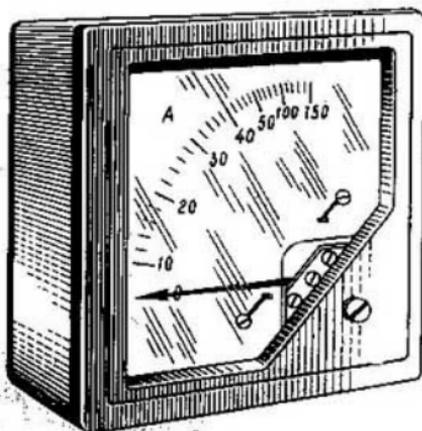


Fig. 23. Aspecto exterior de un amperímetro

Las milésimas partes del amperio, los miliamperios, se miden con un miliamperímetro. Si la cantidad de electricidad que pasa por el conductor varía, variará también la intensidad de la corriente.

En este caso el valor medio de la corriente, durante un tiempo dado, se determina según la fórmula:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t},$$

donde ΔQ = variación de la cantidad de electricidad;

Δt = variación del tiempo.

Cuanto menor es el tiempo Δt , tanto menor es la diferencia entre el valor medio de la corriente y el verdadero valor instantáneo de la corriente en el momento dado.

La corriente que no varía en magnitud y dirección se denomina corriente continua.

Las pilas eléctricas, acumuladores y generadores de corriente continua generan corriente continua, si las condiciones de trabajo del circuito eléctrico no cambian.

La relación entre la intensidad de la corriente I y el área de la sección del conductor S se denomina densidad de la corriente y se designa por la letra griega δ (delta)

$$\delta = \frac{I}{S}.$$

Puesto que la superficie de la sección de los conductores se da generalmente en milímetros cuadrados, la densidad de la corriente se mide en A/mm².

§ 19. Resistencia y conductividad de los conductores.

Dependencia de la resistencia de los conductores de las condiciones físicas

Al cerrar el circuito eléctrico, en cuyos bornes existe una diferencia de potencial, surge una corriente eléctrica. Los electrones libres se desplazan por el conductor por efecto de las fuerzas eléctricas del campo. Los electrones en su movimiento chocan contra los átomos del conductor y les entregan la reserva de su energía cinética. La velocidad de movimiento de los electrones varía ininterrumpidamente: al chocar los electrones contra los átomos, moléculas y otros electrones su velocidad disminuye, después, bajo el efecto del campo eléctrico, aumenta, y disminuye otra vez al chocar nuevamente con ellos. Por lo tanto, en el conductor se establece un movimiento uniforme del flujo de electrones con una velocidad de fracciones de centímetro por segundo. Por consiguiente, los electrones encuentran siempre al pasar por el conductor una resistencia a su movimiento. Al pasar la corriente eléctrica por el conductor, éste se calienta.

Se llama resistencia eléctrica del conductor, representada por la letra latina R , a la propiedad del cuerpo o del medio de convertir la energía eléctrica en térmica cuando por él circula una corriente eléctrica. La resistencia eléctrica se representa tal en los esquemas como se muestra en la fig. 24, *a*.

La resistencia eléctrica variable utilizada para cambiar la corriente en el circuito se llama *r e ó s t a t o*. Los reóstatos se representan en los esquemas tal como se muestra en la fig. 24, *b* y *c*. Generalmente el reóstato se prepara con alambre de una determinada

resistencia, arrollado en espiras sobre un cilindro aislador. El cursor o la corredera del reóstato se lleva a determinada posición, gracias a lo cual se crea en el circuito la resistencia necesaria.

Un conductor largo, de sección pequeña, opone a la corriente una resistencia grande. Los conductores cortos, de sección grande, ofrecen a la corriente una resistencia pequeña.

Si tomamos dos conductores de diferentes materiales, pero de longitud y sección igual, los conductores transmitirán la corriente

de modo distinto. Esto nos indica que la resistencia del conductor depende del material del mismo.

La temperatura del conductor ejerce también influencia sobre su resistencia. Elevando la temperatura, aumenta la resistencia de los metales, pero la resistencia de los líquidos y del carbón disminuye. Solamente algunas aleaciones metálicas especiales (manganina, constantán, níquelina y otros) al aumentar sus temperaturas, cambian muy poco su resistencia.

De este modo, vemos que la resistencia eléctrica del conductor depende: 1) de la longitud, 2) de la sección transversal, 3) del material, 4) de la temperatura.

Como unidad de resistencia se ha adoptado el ohmio. El ohmio se re-

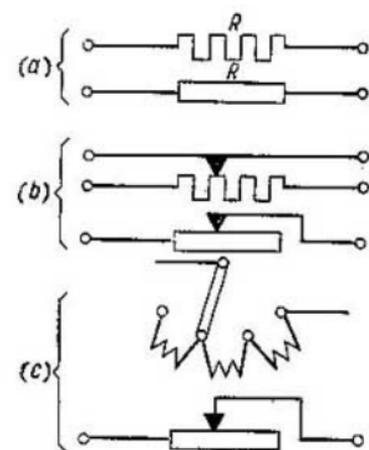


Fig. 24. Representación convencional de la resistencia eléctrica

presenta frecuentemente con la letra griega mayúscula Ω (omega). Por eso, en vez de escribir «La resistencia del conductor es igual a 15 ohmios», puede hacerse del modo siguiente: $R = 15\Omega$.

1.000 ohmios es igual a 1 kilohmio (1 k Ω).

1.000.000 ohmios es igual a 1 megohmio (1 M Ω).

Al comparar la resistencia de los conductores de diferentes materiales, es necesario tomar para cada muestra una longitud y sección determinadas. Entonces podemos comprobar qué material transmite mejor la corriente eléctrica.

La resistencia en ohmios de un conductor de 1 m de longitud y de 1 mm² de sección se llama resistencia específica o resistividad y se designa con la letra griega ρ (rho). En la tabla 1 se dan las resistencias específicas de algunos conductores.

Por la tabla vemos que un alambre de hierro de 1 m de longitud y de 1 mm² de sección tiene una resistencia de 0,13 Ω . Para obtener una resistencia de 1 Ω hay que tomar 7,7 metros de este alambre. La plata tiene la menor resistencia específica. Se puede obtener la resistencia de 1 Ω si tomamos 62,5 m de alambre de plata de 1 mm² de sección. La plata es el mejor conductor, pero su elevado precio

Resistencias específicas de diferentes conductores

Material del conductor	Resistencia específica ρ en $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$
Plata	0,016
Cobre	0,0175
Aluminio	0,03
Volframio (tungsteno)	0,05
Hierro	0,13
Plomo	0,2
Niquelina (aleación de cobre, níquel y zinc)	0,42
Manganina (aleación de cobre, níquel y manganeso)	0,43
Constantán (aleación de cobre, níquel y aluminio)	0,5
Mercurio	0,94
Nicromo (aleación de níquel, cromo, hierro y manganeso)	1,1

excluye la posibilidad de su amplio empleo. Después de la plata en la tabla le sigue el cobre: 1 m de alambre de cobre de 1 mm² de sección tiene una resistencia de 0,0175Ω. Para obtener la resistencia de 1Ω, es necesario tomar 57 m de este alambre.

El cobre químicamente puro, obtenido mediante afinación, se emplea muy ampliamente en la electrotecnia para fabricar conductores, cables, devanados de máquinas eléctricas y aparatos. También se emplean ampliamente como conductores el aluminio y el hierro.

La resistencia de un conductor se puede determinar por la fórmula:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

donde R es la resistencia del conductor, en ohmios;

ρ = resistencia específica del conductor;

l = longitud del conductor, en m;

S = sección del conductor, en mm².

Ejemplo 1. Determinar la resistencia de 200 m de alambre de hierro de 5 mm² de sección.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,13 \cdot 200}{5} = 5,2\Omega.$$

Ejemplo 2. Calcular la resistencia de 2 km de alambre de aluminio de 2,5 mm² de sección.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,03 \cdot 2.000}{2,5} = 24\Omega.$$

De la fórmula de la resistencia se puede determinar fácilmente la longitud, la resistencia específica y la sección del alambre.

Ejemplo 3. Para un receptor de radio es necesario enrollar una resistencia de 30Ω de alambre de niquelina de $0,21 \text{ mm}^2$ de sección. Determinar la longitud necesaria del alambre.

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho} = \frac{30 \cdot 0,21}{0,42} = 15 \text{ m.}$$

Ejemplo 4. Determinar la sección de 20 m de alambre de nicromo, si su resistencia es igual a 25Ω .

$$S = \frac{\rho \cdot l}{R} = \frac{1,1 \cdot 20}{25} = 0,88 \text{ mm}^2.$$

Ejemplo 5. Un alambre de $0,5 \text{ mm}^2$ de sección y de 40 m de longitud tiene una resistencia de 16Ω . Determinar el material del conductor.

El material del conductor caracteriza su resistencia específica.

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} = \frac{16 \cdot 0,5}{40} = 0,2.$$

Según la tabla de las resistencias específicas vemos que esta resistencia pertenece al plomo.

Más arriba se dijo que la resistencia de los conductores depende de la temperatura. Hagamos el experimento siguiente. Arrollemos en espiras varios metros de alambre metálico fino y conectemos esta espiral a un circuito de acumuladores. Para medir la corriente intercalamos al circuito un amperímetro. Al calentar la espiral sobre la llama de un mechero se puede notar que las indicaciones del amperímetro disminuirán. Esto muestra que con el calentamiento la resistencia del alambre aumenta.

Al calentar algunos metales en 100°C , su resistencia aumenta 40—50%. Si se calientan aleaciones su resistencia varía muy poco. Al variar la temperatura, la resistencia de algunas aleaciones especiales, prácticamente, no cambia. Al elevar la temperatura, la resistencia de los conductores metálicos aumenta y, al contrario, la resistencia de los electrolitos (conductores líquidos), carbón y algunas sustancias sólidas disminuye.

La capacidad de los metales de cambiar su resistencia, al variar la temperatura, es aprovechada en los termómetros de resistencia. Este termómetro es un alambre de platino arrollado sobre una armazón de mica. Colocando el termómetro, por ejemplo, en un horno y midiendo la resistencia del alambre de platino antes y después del calentamiento, se puede determinar la temperatura en el horno.

La variación de la resistencia al ser calentado 1°C un conductor cualquiera con 1Ω de resistencia inicial se denomina coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura o, simplemente, coeficiente térmico y se designa con α .

Si a la temperatura t_0 , la resistencia del conductor es igual a R_0 , y a la temperatura t , igual a R_t , el coeficiente de variación de la

resistencia con la temperatura será:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0(t - t_0)}$$

A continuación se dan los valores del coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura α para algunos metales (tabla-2):

Tabla 2

Valores del coeficiente térmico para algunos metales

Metal	α	Metal	α
Plata	0,0035	Mercurio	0,0090
Cobre	0,0040	Niquelina	0,0003
Hierro	0,0066	Constantán	0,000005
Volframio	0,0045	Nicromo	0,00016
Platino	0,0032	Manganina	0,00005

De la fórmula anterior determinamos R_t :

$$R_t = R_0 [1 \pm \alpha (t - t_0)]$$

Ejemplo 6. Determinar la resistencia de un alambre de hierro calentado hasta 200°C, si su resistencia a 0° es de 100Ω.

$$R_t = R_0 [1 + \alpha (t - t_0)] = 100 (1 + 0,0066 \cdot 200) = 232\Omega$$

Ejemplo 7. El termómetro de resistencia hecho de alambre de platino, situado en un local a la temperatura de 15°C tiene la resistencia de 20Ω. El termómetro fue colocado en un horno y dentro de algún tiempo fue medida su resistencia, resultando ésta igual a 52Ω. Determinar la temperatura del horno.

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_0 \alpha} + t_0 = \frac{52 - 20}{20 \cdot 0,0032} + 15 = 515^\circ\text{C}$$

Hasta aquí hemos estudiado la resistencia del conductor como un obstáculo que opone el conductor a la corriente eléctrica. A pesar de esto la corriente pasa por el conductor. Por consiguiente, además de la resistencia (del obstáculo), el conductor tiene también la capacidad de conducir la corriente eléctrica, es decir, tiene conductancia.

Cuanto más grande es la resistencia de un conductor, tanto menor es su conductancia y tanto peor conduce la electricidad y, al contrario, cuanto más pequeña es la resistencia de un conductor, tanto mayor es su conductancia y tanto mejor conduce la corriente eléctrica. Por eso, la resistencia y la conductancia de un conductor son magnitudes inversas.

Por las matemáticas sabemos que el número inverso a 5 es $\frac{1}{5}$, y, viceversa, el número inverso a $\frac{1}{7}$ es 7. Por consiguiente, si la resistencia del conductor se designa con la letra R , la conductancia se designa con $\frac{1}{R}$. Generalmente la conductancia se designa con la letra G .

La conductancia eléctrica se mide en mhos = $\frac{1}{\text{ohms}}$ (o siemens S).

Ejemplo 8. La resistencia de un conductor es igual a 20Ω . Determinar su conductancia.

Si $R = 20$ ohms, entonces

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ mhos.}$$

Ejemplo 9. La conductancia de un conductor es igual a 0,1 mhos. Determinar su resistencia.

Si $G = 0,1$ mhos, entonces $R = \frac{1}{0,1} = 10\Omega$.

§ 20. Fuerza electromotriz (f. e. m.) de la fuente de corriente. Tensión

Para que la corriente eléctrica circule por el circuito durante largo tiempo, es necesario sostener la diferencia de potencial entre

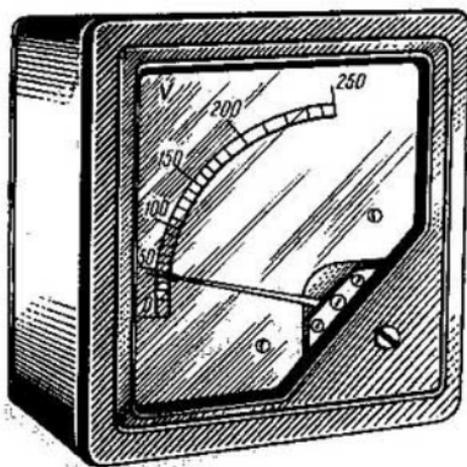


Fig. 25. Aspecto exterior de un voltímetro

los polos de la fuente de corriente. De modo análogo sucede si dos recipientes con diversos niveles de agua son unidos entre sí mediante un tubo: el agua pasa de un recipiente al otro hasta que los niveles

en éstos se igualen. Echando agua en un recipiente y dejándola salir del otro, se puede lograr que el movimiento del agua por el tubo entre los recipientes continúe ininterrumpidamente.

Al funcionar la fuente de corriente los electrones pasan del ánodo al cátodo.

De aquí se puede deducir que en el interior de la fuente de corriente actúa una fuerza que debe mantener sin cesar la corriente en el circuito, es decir, debe asegurar el funcionamiento de esta fuente.

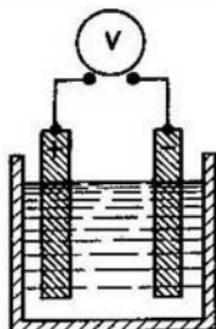


Fig. 26. Medición de la fuerza electromotriz de una pila mediante un voltímetro

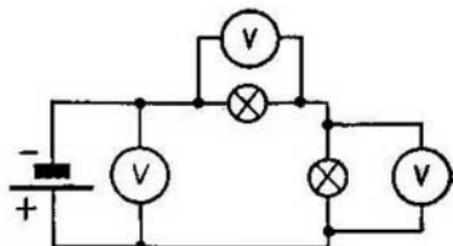


Fig. 27. Medición de tensiones en diferentes sectores de un circuito eléctrico mediante un voltímetro

La causa que establece y mantiene la diferencia de potencial y provoca la corriente en el circuito, superando su resistencia interior y exterior, se llama fuerza electromotriz (abreviada f.e.m.) y se designa con la letra E .

La fuerza electromotriz en las fuentes de corriente surge por influencia de causas específicas para cada una de ellas.

En las fuentes químicas de corriente (pilas eléctricas, acumuladores), la f.e.m. se obtiene como resultado de reacciones químicas; en los generadores, la f.e.m. surge a consecuencia de la inducción electromagnética; en los elementos térmicos, como resultado de la energía térmica, etc.

La diferencia de potencial que provoca el paso de la corriente, a través de la resistencia de un sector del circuito eléctrico, se llama tensión entre los extremos de este sector. La fuerza electromotriz y la tensión se miden en voltios. Para medir la f.e.m. y las tensiones se emplean instrumentos especiales que se denominan voltímetros (fig. 25).

Las milésimas partes del voltio, los milivoltios, se miden con milivoltímetros, los miles de voltios, kilovoltios, se miden con kilovoltímetros.

Para medir la f.e.m. de la fuente de corriente, es necesario conectar el voltímetro a los bornes de ésta, cuando el circuito exterior

esté abierto (fig. 26). Para medir la tensión en cualquier sector del circuito eléctrico hay que conectar el voltímetro a los extremos de este sector (fig. 27).

§ 21. Ley de Ohm

Montemos el circuito eléctrico (fig. 28,a) que consta del acumulador 1 con tensión de 2 V, el reóstato 2, dos instrumentos de medición, es decir, voltímetro 3 y amperímetro 4 y los conductores de unión 5. Establezcamos en el circuito, por medio del reóstato, una

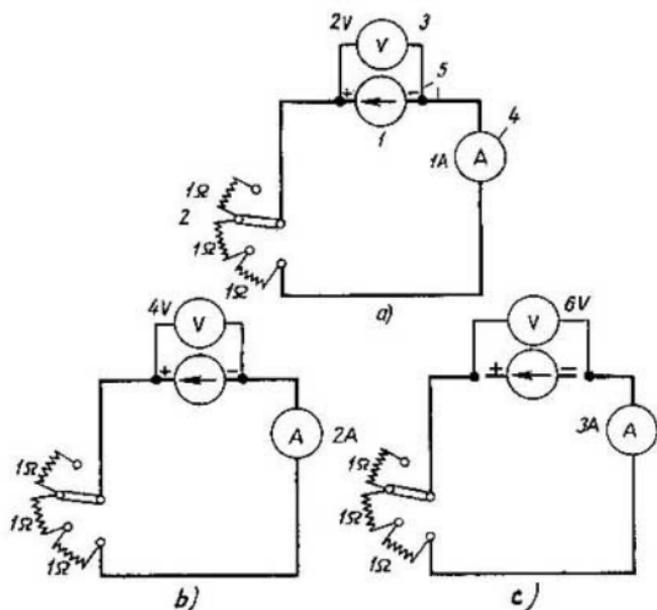


Fig. 28. Variación de la intensidad de corriente en un circuito eléctrico mediante el cambio de la tensión, siendo constante la resistencia

resistencia igual a 2Ω . En este caso, el voltímetro conectado a los bornes del acumulador, indicará la tensión de 2 V, y el amperímetro, intercalado en serie en el circuito, mostrará una corriente de 1 A. Elevemos la tensión hasta 4 V, conectando otro acumulador (fig. 28,b). Con la misma resistencia en el circuito, 2Ω , el amperímetro indicará una corriente de 2 A. El acumulador de 6 V de tensión cambiará las indicaciones del amperímetro hasta 3 A (fig. 28,c). Reunamos nuestras observaciones en la tabla 3.

De los datos se puede deducir que la corriente en el circuito con resistencia constante, es tanto más grande, cuanto mayor es la tensión en este circuito, aumentando la corriente tantas veces, cuantas aumenta la tensión.

Tabla 3

Corriente eléctrica en el circuito en función de la tensión, siendo la resistencia constante

Tensión del circuito, en V	Resistencia del circuito, en Ω	Intensidad de la corriente en el circuito, en A.
2	2	1
4	2	2
6	2	3

Conectemos al mismo circuito un acumulador de 2 V de tensión e intercalemos en el circuito una resistencia igual a 1 ohm mediante el reóstato (fig. 29,a). En este caso el amperímetro indicará 2 A. Aumentemos con el reóstato la resistencia hasta 2 ohms (fig. 29,b).

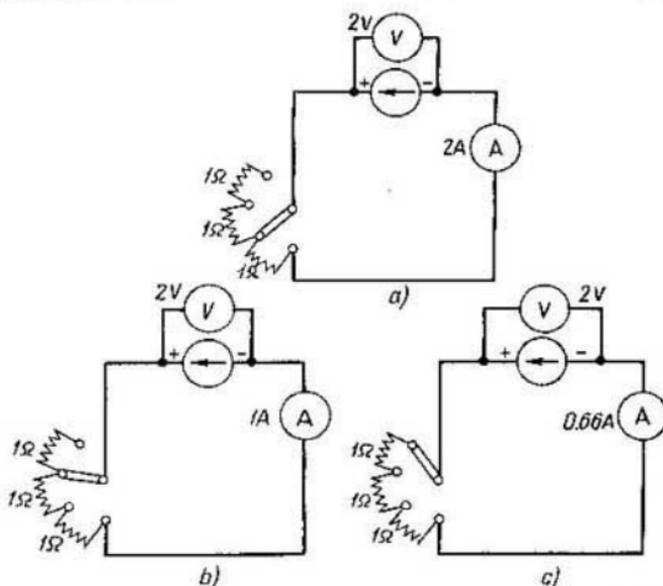


Fig. 29. Variación de la intensidad de corriente en un circuito eléctrico mediante el cambio de la resistencia, siendo constante la tensión

Las indicaciones del amperímetro (siendo constante la tensión en el circuito) serán entonces de 1 A.

Siendo la resistencia en el circuito de 3 ohms (fig. 29,c) las indicaciones del amperímetro serán iguales a $\frac{2}{3}$ A.

Tabla 4

Corriente en el circuito en función de la resistencia,
siendo la tensión constante

Tensión del circuito, en V	Resistencia del circuito, en Ω	Intensidad de la corriente en el cir- cuito, en A
2	1	2
2	2	1
2	3	$\frac{2}{3}$

Reunamos en la tabla 4 los resultados del ensayo.

De estos datos se deduce que, siendo la tensión constante, la intensidad de la corriente en el circuito será tanto mayor, cuanto menor es la resistencia de éste, aumentando la corriente tantas veces, cuantas disminuye la resistencia del mismo.

Como muestran los experimentos, la intensidad de la corriente en un sector del circuito es directamente proporcional a la tensión en este sector e inversamente proporcional a la resistencia del mismo sector del circuito. Esta dependencia es conocida como ley de Ohm.

Representando, pues, la intensidad en amperios con I , la tensión en voltios con U , y la resistencia en ohmios con R , la ley de Ohm puede ser expresada por la fórmula:

$$I = \frac{U}{R},$$

es decir, la intensidad en el sector dado del circuito es igual a la tensión en este sector dividida por la resistencia del mismo sector.

Ejemplo 10. Determinar la intensidad de la corriente que pasa por el filamento de una lámpara de incandescencia, si el filamento tiene una resistencia constante de 240Ω y la lámpara está conectada a una red de 120 V de tensión.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{240} = 0,5 \text{ A.}$$

Aplicando la fórmula de la ley de Ohm, se puede determinar también la tensión y la resistencia en el circuito.

$$U = IR,$$

es decir, la tensión en el circuito es igual al producto de la intensidad de la corriente por la resistencia del mismo y

$$R = \frac{U}{I},$$

es decir, la resistencia del circuito es igual a la tensión dividida por la intensidad de la corriente en el circuito.

Ejemplo 11. ¿Qué tensión es necesaria para que en un circuito con resistencia de 6 ohms pase una corriente de 20 A?

$$U = IR = 20 \cdot 6 = 120 \text{ V.}$$

Ejemplo 12. Por la resistencia de un hornillo eléctrico pasa una corriente de 5 A. El hornillo está conectado a una red de 220 V. Determinar la resistencia del hornillo eléctrico

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44 \Omega.$$

Si en la fórmula $U = IR$ la intensidad de la corriente es igual a 1 A, y la resistencia a 1Ω , la tensión será igual a 1 V.

$$1 \text{ V} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ ohm.}$$

De aquí se deduce que: la tensión de 1 V actúa en el circuito con resistencia de 1Ω , cuando la intensidad de la corriente es igual a 1 A.

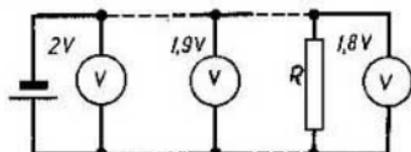


Fig. 30. Caída de tensión a lo largo de un circuito eléctrico

En la fig. 30 se muestra un circuito eléctrico que consta de un acumulador, una resistencia R y conductores de unión con una resistencia determinada.

Como se ve en el esquema, el voltímetro conectado a los bornes del acumulador, indica la tensión de 2 V. En la mitad de la línea el voltímetro muestra ya sólo 1,9 V y cerca de la resistencia R la tensión es igual solamente a 1,8 V. Esta disminución de la tensión a lo largo del circuito entre los puntos aislados de este circuito se llama *caída de tensión*.

La caída de tensión a lo largo del circuito eléctrico sucede porque una parte de tensión aplicada se gasta para superar la resistencia del circuito. Además, la caída de tensión en el circuito será tanto mayor, cuanto mayor es la intensidad de la corriente y cuanto mayor es la resistencia de este sector del circuito. Para el sector del circuito, de acuerdo con la ley de Ohm, se deduce que la caída de tensión, en voltios, es igual a la intensidad de la corriente, en amperios, multiplicada por la resistencia, en ohms:

$$U = IR$$

Ejemplo 13. Desde un generador, cuya tensión entre los bornes es igual a 115 V, la energía eléctrica se suministra a un motor eléctrico por conductores cuya resistencia es igual a $0,1 \Omega$. Determinar la tensión entre los bornes del motor si éste consume una corriente de 50 A.

Es evidente que entre los bornes del motor la tensión será menor que entre los del generador a causa de la caída de tensión que tiene lugar en la red de unión. Según la fórmula

$$U = IR = 50 \cdot 0,1 = 5 \text{ V.}$$

Si en la red de unión la caída de tensión es igual a 5 V, la tensión del electro-motor será $115 - 5 = 110 \text{ V}$.

Ejemplo 14. Un generador produce una tensión de 240 V. La energía eléctrica se transmite por una red de unión, que consta de dos conductores de cobre de 350 m de largo cada uno, con sección de 10 mm^2 , y se aplica al motor eléctrico que consume una corriente de 15 A. Es necesario determinar la tensión entre los bornes del motor.

La tensión entre los bornes del motor será menor que entre los bornes del generador en una magnitud igual a la caída de tensión a lo largo de la red. La caída de tensión en la red es: $U = I \cdot R$.

Ya que la resistencia R de los conductores es desconocida, la determinamos según la fórmula:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,0175 \cdot 700}{10} = 1,22 \Omega,$$

(la longitud l es igual a 700 metros, ya que la corriente ha de pasar desde el generador hasta el motor y regresa nuevamente al generador).

Reemplazando R en la fórmula tendremos:

$$U = IR = 15 \cdot 1,22 = 18,3 \text{ V.}$$

Por consiguiente, la tensión en los bornes del motor será $240 - 18,3 = 221,7 \text{ V}$.

Ejemplo 15. Determinar la sección de los conductores de aluminio que es necesario emplear para conducir la energía eléctrica al motor que funciona con tensión de 120 V y corriente de 20 A. La energía será aplicada al motor desde un generador con tensión de 127 V por una red de 150 m de largo.

Primero determinamos la caída de tensión tolerable:

$$127 - 120 = 7 \text{ V.}$$

La resistencia de los conductores de la red debe ser igual a

$$R = \frac{U}{I} = \frac{7}{20} = 0,35 \Omega.$$

De la fórmula

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

determinamos la sección del conductor:

$$S = \frac{\rho \cdot l}{R} = \frac{0,03 \cdot 300}{0,35} = 25,7 \text{ mm}^2.$$

Por medio de tablas elegimos una sección igual a 25 mm^2 . Si esta red es de cobre, su sección será igual a:

$$S = \frac{\rho \cdot l}{R} = \frac{0,0175 \cdot 300}{0,35} = 15 \text{ mm}^2.$$

Elegimos la sección de 16 mm^2 .

Es necesario hacer notar que a veces hay que lograr premeditadamente una caída de tensión para anular la parte excedente de la tensión aplicada.

Ejemplo 16. Para una ignición estable de un arco eléctrico se exige una corriente de 10 A con tensión de 40 V. Determinar la magnitud de la resistencia adicional que es necesario conectar en serie con el dispositivo de arco eléctrico para alimentar éste de una red con tensión de 120 V.

La caída de tensión en la resistencia adicional debe ser:

$$120 - 40 = 80 \text{ V.}$$

Conociendo la caída de tensión en la resistencia adicional y la intensidad de la corriente que pasa a través de ella, se puede determinar el valor de esta resistencia para el sector del circuito, según la ley de Ohm:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{80}{10} = 8 \Omega.$$

Al examinar el circuito eléctrico no hemos tenido en cuenta hasta el presente que la corriente pasa no sólo por el circuito externo, sino también por el circuito interno, por el interior de la pila, el acumulador o de otra fuente de corriente.

Al pasar la corriente eléctrica por el circuito interno supera su resistencia interna y, por eso, en el interior de la fuente de corriente, también tiene lugar una caída de tensión.

Por consiguiente, la fuerza electromotriz (f.e.m.) da la fuente de corriente compensa las pérdidas internas y externas de tensión en el circuito.

Si representamos con E la fuerza electromotriz en voltios; I , la intensidad en amperios; R , la resistencia de la parte externa del circuito en ohmios; R_0 , la resistencia de la parte interna del circuito en ohmios; U_0 , la caída de tensión interna y U , la caída de tensión externa tendremos que

$$E = U_0 + U = IR_0 + IR = I(R_0 + R),$$

$$I = \frac{E}{R_0 + R}.$$

Esta es la fórmula de la ley de Ohm para todo el circuito. Esta ley dice: *la intensidad de la corriente en el circuito eléctrico es igual a la fuerza electromotriz dividida por la resistencia de todo el circuito (suma de resistencias interna y externa).*

Ejemplo 17. La fuerza electromotriz E de una pila eléctrica es igual a 1,5 V, su resistencia interna $R_0 = 0,3 \Omega$. La pila está cerrada con una resistencia $R = 2,7 \Omega$. Determinar la intensidad de la corriente en el circuito

$$I = \frac{E}{R_0 + R} = \frac{1,5}{0,3 + 2,7} = 0,5 \text{ A.}$$

Ejemplo 18. Determinar la f. e. m. de la pila E , cerrada con una resistencia $R = 2 \Omega$, si la intensidad de la corriente en el circuito es $I = 0,6 \text{ A}$. La resistencia interna de la pila $R_0 = 0,5 \Omega$.

El voltímetro, conectado a los bornes de la pila, indicará la tensión en éstos, igual a la del circuito externo o a la caída de tensión en el circuito externo.

$$U = IR = 0,6 \cdot 2 = 1,2 \text{ V.}$$

Por consiguiente, una parte de la f. e. m. de la pila compensa las pérdidas internas y la otra parte, 1,2 V, se dirige al circuito externo.

La caída de tensión interna será:

$$U_0 = IR_0 = 0,6 \cdot 0,5 = 0,3 \text{ V.}$$

Ya que $E = U_0 + U$, entonces

$$E = 0,3 + 1,2 = 1,5 \text{ V.}$$

El mismo resultado se puede obtener si aplicamos la fórmula de la ley de Ohm para todo el circuito:

$$I = \frac{E}{R_0 + R},$$

de donde

$$E = I(R_0 + R) = 0,6(0,5 + 2) = 1,5 \text{ V.}$$

El voltímetro, conectado a los bornes de cualquier fuente de corriente indica, durante su funcionamiento, el voltaje en ellos o el voltaje del circuito externo. Si el circuito eléctrico se abre, la corriente no circulará por él. La corriente no circulará tampoco en el interior de la fuente de corriente y, por lo tanto, no habrá caída de tensión interna. Por eso, cuando el circuito está abierto, el voltímetro indica la f.e.m. de la fuente de corriente.

De este modo, el voltímetro conectado a los bornes de la fuente de corriente muestra:

a) la tensión del circuito externo, si el circuito eléctrico está cerrado;

b) la f. e. m. de la fuente de corriente, si el circuito eléctrico está abierto.

Ejemplo 19. La fuerza electromotriz de la fuente de corriente es de 1,8 V. Esta se cierra con una resistencia $R = 2,7\Omega$. La intensidad de la corriente en el circuito es igual a 0,5 A. Determinar la resistencia interna R_0 de la fuente de corriente y la caída de tensión interna U_0 .

$$R_0 + R = \frac{E}{I} = \frac{1,8}{0,5} = 3,6\Omega.$$

Puesto que, $R = 2,7\Omega$, entonces

$$R_0 = 3,6 - 2,7 = 0,9\Omega;$$

$$U_0 = IR_0 = 0,5 \cdot 0,9 = 0,45 \text{ V.}$$

De los ejemplos mencionados se deduce que la indicación del voltímetro, conectado a los bornes de la fuente de corriente, varía si cambian las condiciones de trabajo del circuito externo. Al aumentar la intensidad en el circuito externo aumenta también la caída de tensión interna. Por eso, cuando la f.e.m. es constante, el circuito externo tiene una tensión cada vez menor.

Tabla 5

Tensión del circuito externo en función de la resistencia R , siendo la f.e.m. y la resistencia interna R_0 constantes

E	R_0	R	$I = \frac{E}{R_0 + R}$	$U_0 = I \cdot R_0$	$U = I \cdot R$
2	0,5	2	0,8	0,4	1,6
2	0,5	1	1,33	0,67	1,33
2	0,5	0,5	2	1	1

En la tabla 5 se muestra de qué modo cambia la tensión del circuito externo U , en función de la variación de la resistencia exterior R , cuando la f.e.m. E , y la resistencia interna R_0 , de la fuente de energía eléctrica son constantes.

§ 22. Conexión de conductores entre sí. Primera ley de Kirchoff

La unión entre sí de varios conductores del circuito externo puede ejecutarse en serie, en paralelo y mixta.

La conexión en serie de los conductores consiste en la unión del extremo final (F) del primer conductor con el comienzo (C) del segundo, el extremo del segundo, con el comienzo del tercero, etc. (fig. 31).

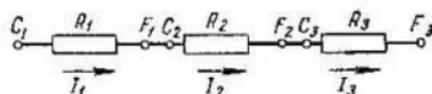


Fig. 31. Conexión en serie de conductores

La resistencia total del circuito compuesto de varios conductores conectados en serie es igual a la suma de la resistencia de cada conductor:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n.$$

La corriente en cualquier parte del circuito en serie es igual:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I.$$

Ejemplo 20. En la figura 32 se muestra un circuito eléctrico compuesto de tres resistencias conectadas en serie: $R_1 = 2\Omega$; $R_2 = 3\Omega$; $R_3 = 5\Omega$. Es necesario determinar las indicaciones de los voltímetros V_1 , V_2 , V_3 , y V si la corriente en el circuito es igual a 4 A.

La resistencia de todo el circuito será:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 2 + 3 + 5 = 10\Omega.$$

Según la ley de Ohm la tensión entre los bornes del circuito es igual a la intensidad de la corriente multiplicada por su resistencia:

$$U = IR = 4 \cdot 10 = 40 \text{ V.}$$

Por lo tanto, el voltímetro V conectado a los bornes de la fuente de corriente indicará la tensión de 40 V.

Al fluir la corriente, tendrá lugar la caída de tensión en la resistencia R_1

$$U_1 = IR_1 = 4 \cdot 2 = 8 \text{ V.}$$

El voltímetro V_1 conectado en los puntos a y b indicará 8 V.

Tiene lugar también la caída de tensión en la resistencia R_2 :

$$U_2 = IR_2 = 4 \cdot 3 = 12 \text{ V.}$$

El voltímetro V_2 conectado en los puntos c y d indicará 12 V.

La caída de tensión en la resistencia R_3 es:

$$U_3 = IR_3 = 4 \cdot 5 = 20 \text{ V.}$$

El voltímetro V_3 , conectado en los puntos e y f , indicará 20 V.

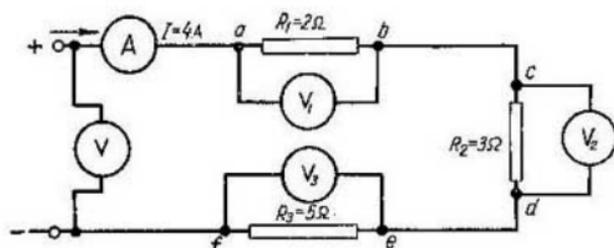


Fig. 32. Esquema de medición de tensiones en diferentes sectores de un circuito eléctrico

Si un extremo del voltímetro se conecta al punto a y el otro extremo al punto d , el instrumento indicará la diferencia de potencial entre estos puntos, igual a la suma de las caídas de tensión en las resistencias R_1 y R_2 ($8 + 12 = 20$ V).

De este modo, el voltímetro V que mide la tensión entre los bornes del circuito, y conectado entre los puntos a y f , indicará la diferencia de potencial entre estos puntos o la suma de las caídas de tensión en las resistencias R_1 , R_2 y R_3 .

De aquí se deduce que la suma de las caídas de tensión en cada sector del circuito eléctrico es igual a la tensión entre los bornes del circuito.

Ya que en la conexión en serie la corriente del circuito es igual en todos los sectores, la caída de tensión es proporcional a la resistencia del sector dado.

Ejemplo 21. Tres resistencias de 10, 15 y 20 Ω están unidas en serie, como se muestra en la fig. 33. La corriente en el circuito es de 5 A. Determinar la caída de tensión en cada resistencia:

$$U_1 = IR_1 = 5 \cdot 10 = 50 \text{ V;}$$

$$U_2 = IR_2 = 5 \cdot 15 = 75 \text{ V;}$$

$$U_3 = IR_3 = 5 \cdot 20 = 100 \text{ V.}$$

La tensión total del circuito es igual a la suma de las caídas de tensión en distintos sectores del circuito:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 50 + 75 + 100 = 225 \text{ V.}$$

La conexión en paralelo o derivación de los conductores toma este nombre cuando los comienzos de todos los conductores están unidos en un punto, y los extremos finales en otro punto (fig. 34).

Un extremo del circuito se conecta a un polo de la fuente de tensión y otro extremo del circuito al polo opuesto.

En la figura se ve que con la conexión en paralelo de los conductores, hay varios caminos para el paso de la corriente. La corriente,

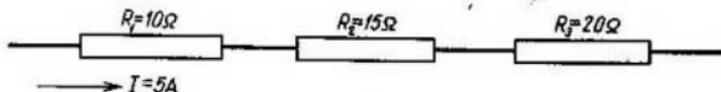


Fig. 33. Para el ejemplo 21

al llegar al punto de derivación A , se divide y es igual a la suma de corrientes que parten de este punto:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Si la corriente que llega al punto de derivación se considera como positiva, y las que parten, como corrientes negativas, entonces para el punto de derivación se puede escribir:

$$\sum_{k=1}^{k=n} I_k = 0,$$

es decir, la suma algebraica de todas las corrientes para cualquier punto de derivación del circuito es igual a cero. Esta relación que une

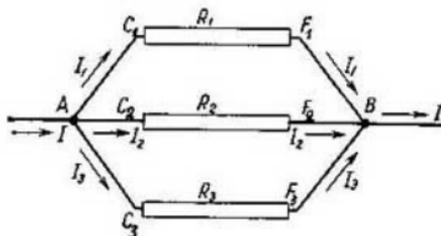


Fig. 34. Conexión en paralelo de conductores

las corrientes en cualquier punto de derivación del circuito se llama la primera ley de Kirchhoff. Generalmente, al calcular los circuitos eléctricos, las direcciones de las corrientes en las derivaciones conectadas a cualquier punto de derivación son desconocidas. Por eso, para tener la posibilidad de escribir la ecuación de la primera ley de Kirchhoff, antes de hacer los cálculos, es necesario elegir a voluntad las así llamadas direcciones positivas de las corrientes en todas sus derivaciones y señalarlas en el esquema con flechas.

Aplicando la ley de Ohm, se puede deducir la fórmula para calcular la resistencia total de la conexión en paralelo.

La corriente total que llega al punto *A* es igual a:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Las corrientes en cada una de las ramas tienen los siguientes valores:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3}.$$

De acuerdo con la primera ley de Kirchhoff

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

esto es

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}.$$

Sacando *U* como factor común en la parte derecha de la igualdad obtendremos:

$$\frac{U}{R} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right).$$

Simplificando *U* en ambas partes de la igualdad, obtendremos la fórmula de la conductancia total:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \text{ o también, } G = G_1 + G_2 + G_3.$$

De manera que, en la conexión en paralelo no aumenta la resistencia, sino la conductancia.

Ejemplo 22. Determinar la resistencia total de tres resistencias conectadas en paralelo, si $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 3\Omega$, $R_3 = 4\Omega$.

$$G = G_1 + G_2 + G_3 = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} = \frac{6+4+3}{12} = \frac{13}{12} \text{ mhos,}$$

de donde

$$R = \frac{12}{13} = 0,92\Omega.$$

Ejemplo 23. Cinco resistencias de 20, 30, 15, 40 y 60 Ω están conectadas en paralelo al circuito. Determinar la resistencia total:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 = \frac{1}{20} + \frac{1}{30} + \frac{1}{15} + \frac{1}{40} + \frac{1}{60} = \frac{6+4+8+3+2}{120} = \frac{23}{120} \text{ mhos.}$$

de donde

$$R = \frac{120}{23} = 5,2\Omega.$$

Al calcular la resistencia total del circuito con derivaciones es necesario tener en cuenta que la resistencia total es siempre menor que la resistencia más pequeña de éste.

Si las resistencias conectadas en paralelo son iguales entre sí, la resistencia total R del circuito es igual a la resistencia de una derivación R_1 dividida por el número de derivaciones n :

$$R = \frac{R_1}{n}.$$

Ejemplo 24. Determinar la resistencia total de un circuito con cuatro resistencias de 20Ω cada una, conectadas en paralelo:

$$R = \frac{R_1}{n} = \frac{20}{4} = 5\Omega.$$

Para comprobarlo tratemos de encontrar la resistencia del circuito según la fórmula:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} = \frac{4}{20} \text{ mhos},$$

de donde

$$R = \frac{20}{4} = 5\Omega.$$

Vemos que el resultado es el mismo.

Ejemplo 25. Hay que determinar las corrientes de cada derivación en la conexión en paralelo, como está indicado en la fig. 35, a.

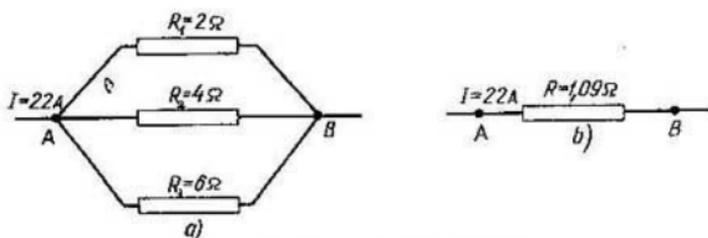


Fig. 35. Para el ejemplo 25

Primero calculamos la resistencia total del circuito:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} = \frac{6 + 3 + 2}{12} = \frac{11}{12} \text{ mhos},$$

de donde

$$R = \frac{12}{11} = 1,09\Omega.$$

Ahora podemos representar todo el circuito en forma simplificada, como una sola resistencia (fig. 35, b).

La caída de tensión entre los puntos A y B será:

$$U = IR = 22 \cdot 1,09 = 24 \text{ V}.$$

Volviendo a la fig. 35, a, vemos que las tres resistencias están a una tensión de 24 V, ya que están conectadas entre los puntos A y B.

Analizando la primera derivación con la resistencia R_1 , vemos que la tensión en este sector del circuito es de 24 V, y la resistencia, 2 ohms. De acuerdo con la ley de Ohm para cualquier parte del circuito, la corriente será:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{24}{2} = 12 \text{ A}.$$

La corriente de la segunda derivación será:

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{24}{4} = 6 \text{ A.}$$

La corriente de la tercera derivación:

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{24}{6} = 4 \text{ A.}$$

Comprobando de acuerdo con la primera ley de Kirchhoff,

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 12 + 6 + 4 = 22 \text{ A.}$$

Por lo tanto, el ejemplo está resuelto correctamente.

Ha de prestarse atención a la manera de cómo se distribuyen las corrientes en las derivaciones de la conexión en paralelo.

La primera derivación: $R_1 = 2$ ohms, $I_1 = 12$ A.

La segunda derivación: $R_2 = 4$ ohms, $I_2 = 6$ A.

La tercera derivación: $R_3 = 6$ ohms, $I_3 = 4$ A.

Como vemos, la resistencia de la primera derivación es dos veces menor que la de la segunda, y la corriente de la primera es dos veces

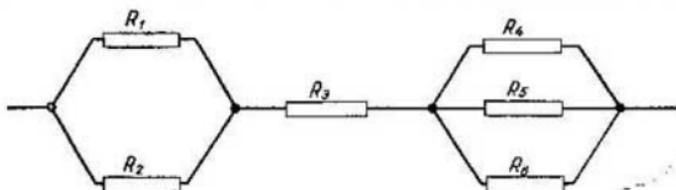


Fig. 36. Conexión mixta de conductores

mayor que la de la segunda. La resistencia de la tercera es tres veces mayor que la resistencia de la primera, y la corriente de la tercera es tres veces menor que la corriente de la primera. De aquí se puede deducir que las corrientes en las derivaciones conectadas en paralelo son inversamente proporcionales a las resistencias de éstas. De este modo, por la derivación con gran resistencia pasará una corriente menor que por la que tiene resistencia pequeña.

Para dos derivaciones en paralelo se puede emplear también la fórmula dada antes.

Sin embargo, la resistencia total en este caso se puede calcular con mayor facilidad según la fórmula:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}$$

o definitivamente:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

La conexión mixta de los conductores recibe su nombre de la conexión donde hay uniones, tanto en serie, como en paralelo, de conductores independientes. De ejemplo puede servir la conexión representada en la fig. 36.

Ejemplo 26. Determinar la resistencia total de la conexión mixta, representada en la fig. 36, si

$$R_1 = 2\Omega; \quad R_2 = 3\Omega; \quad R_3 = 5\Omega;$$

$$R_4 = 4\Omega; \quad R_5 = 8\Omega; \quad R_6 = 6\Omega.$$

Primero calculamos la resistencia total de la primera derivación:

$$G_{1,2} = G_1 + G_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{3+2}{6} = \frac{5}{6} \text{ mhos,}$$

de donde

$$R_{1,2} = \frac{6}{5} = 1,2\Omega.$$

Después, la resistencia total de la segunda derivación:

$$G_{4,5,6} = G_4 + G_5 + G_6 = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{6} = \frac{6+3+4}{24} = \frac{13}{24} \text{ mhos,}$$

de donde

$$R_{4,5,6} = \frac{24}{13} = 1,85\Omega.$$

Finalmente, la resistencia total del circuito

$$R = R_{1,2} + R_3 + R_{4,5,6} = 1,2 + 5 + 1,85 = 8,05\Omega.$$

§ 23. Trabajo y potencia de la corriente eléctrica

Supongamos un circuito, representado en la fig. 37, al cual está aplicada la tensión constante U .

$$U = \varphi_A - \varphi_B.$$

Durante el tiempo t por el circuito pasa una cantidad de electricidad Q . Las fuerzas del campo eléctrico, que actúan a lo largo del

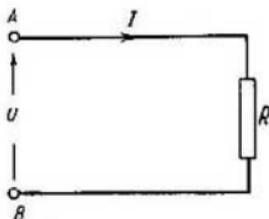


Fig. 37. Trabajo y potencia de la corriente eléctrica

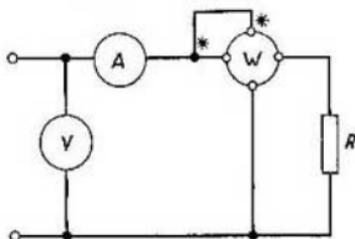


Fig. 38. Esquema de conexión de un vatímetro

conductor, transportan en ese mismo tiempo una carga Q , del punto A al punto B . El trabajo de las fuerzas eléctricas del campo, o lo que es lo mismo, el trabajo de la corriente eléctrica puede ser calculado según la fórmula:

$$A = Q(\varphi_A - \varphi_B) = Q \cdot U,$$

pero puesto que $Q = It$, entonces, finalmente:

$$A = UIt,$$

donde A = trabajo, en julios;

I = corriente, en amperios;

t = tiempo, en segundos;

U = tensión, en voltios.

De acuerdo con la ley de Ohm $U = IR$. Por lo tanto, podemos escribir:

$$A = I^2Rt.$$

El trabajo producido en la unidad de tiempo se llama potencia y se designa con la letra P

$$P = \frac{A}{t}.$$

De esta fórmula se deduce que:

$$A = Pt.$$

La unidad de potencia es:

$$\frac{1 \text{ julio}}{1 \text{ seg}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{seg}} = 1 \text{ W}.$$

1 julio/seg es igual a un vatio (o watt W).

Reemplazando en la fórmula de potencia la expresión para el trabajo de la corriente eléctrica tenemos:

$$P = \frac{UIt}{t} = UI$$

$$P = UI \text{ W};$$

$$P = \frac{I^2Rt}{t} = I^2R; \quad P = I^2R \text{ W}.$$

Además del vatio se emplean unidades mayores de potencia:

$$100 \text{ W} = 1 \text{ hectovatio (hW)}$$

$$1.000 \text{ W} = 1 \text{ kilovatio (kW)}$$

$$1.000.000 \text{ W} = 1 \text{ megavatio (MW)}.$$

La potencia eléctrica se mide con el vatímetro. El vatímetro tiene dos devanados: uno en serie y otro en paralelo. El esquema de conexión del vatímetro está dado en la fig. 38.

De la fórmula $P = IU$ se ve que la potencia que consume el circuito se puede determinar multiplicando la intensidad de la corriente por la tensión. Por eso, para determinar la potencia que consume el circuito, es necesario multiplicar las indicaciones del amperímetro por las del voltímetro.

Así, por ejemplo, la potencia que consume el circuito cuando el amperímetro indica 3 A y el voltímetro, 120 V, será:

$$P = IU = 3 \cdot 120 = 360 \text{ W.}$$

Para las medidas prácticas del trabajo eléctrico el julio es una unidad demasiado pequeña.

Si tomamos el tiempo t no en segundos, sino en horas, obtendremos unidades más grandes de la energía eléctrica:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Wseg}$$

$$1 \text{ Wh} = 3.600 \text{ Wseg} = 3.600 \text{ J}$$

$$100 \text{ Wh} = 1 \text{ hWh}$$

$$1.000 \text{ Wh} = 1 \text{ kWh.}$$

Ejemplo 27. Determinar la potencia que consume un motor eléctrico si la corriente en el circuito es igual a 8 A y el motor está conectado a una red de 220 V.

$$P = IU = 8 \cdot 220 = 1.760 \text{ W} = 17,6 \text{ hW} = 1,76 \text{ kW.}$$

Ejemplo 28. ¿Cuál es la potencia que consume un hornillo eléctrico, si éste toma la de la red intensidad de 5 A y la resistencia del hornillo eléctrico es igual a 24Ω ?

$$P = I^2R = 25 \cdot 24 = 600 \text{ W} = 6 \text{ hW} = 0,6 \text{ kW.}$$

Transformando la potencia mecánica en eléctrica y viceversa, es necesario tener en cuenta que

$$1 \text{ caballo de vapor (CV)} = 736 \text{ W}^*;$$

$$1 \text{ kilovatio (kW)} = 1,36 \text{ CV.}$$

Ejemplo 29. Determinar la energía que consume un hornillo eléctrico de 600 W de potencia durante 5 horas.

$$A = P \cdot t = 600 \cdot 5 = 3.000 \text{ Wh} = 30 \text{ hWh} = 3 \text{ kWh.}$$

Ejemplo 30. Determinar el precio de la energía consumida por doce lámparas de incandescencia durante un mes (30 días), si cuatro de ellas son de 60 W y están encendidas 6 horas al día, y las ocho restantes, de 25 W, durante 4 horas al día.

El precio de la energía (tarifa) es de 0,4 kopeks por 1 hWh.

La potencia de las cuatro lámparas de 60 W cada una:

$$P = 60 \cdot 4 = 240 \text{ W.}$$

La cantidad de horas de alumbrado durante un mes:

$$t = 6 \cdot 30 = 180 \text{ horas.}$$

La energía consumida por estas lámparas:

$$A = P \cdot t = 240 \cdot 180 = 43.200 \text{ Wh} = 43,2 \text{ hWh.}$$

La potencia de las ocho lámparas restantes de 25 W cada una:

$$25 \cdot 8 = 200 \text{ W.}$$

* Caballo de vapor inglés (HP) equivale a 746 W. (N. de la Edit.)

La cantidad de horas de alumbrado con estas lámparas durante un mes:
 $4 \cdot 30 = 120 \text{ h.}$

La energía consumida por estas lámparas:

$$A = P \cdot t = 200 \cdot 120 = 24.000 \text{ Wh} = 240 \text{ kWh.}$$

Total de la energía consumida:

$$432 + 240 = 672 \text{ kWh.}$$

El costo de toda la energía será entonces igual a:

$$672 \cdot 0,4 = 268,8 \text{ kop.} \approx 2 \text{ rub. } 69 \text{ kop.}$$

§ 24. Cortocircuito

En la fig. 39 se muestra un esquema de conexión de la lámpara de incandescencia a la red eléctrica. Si la resistencia de esta lámpara es $R_l = 240 \Omega$ y la tensión de la red $U = 120 \text{ V}$, la intensidad de la corriente en el circuito de la lámpara será:

$$I = \frac{U}{R_l} = \frac{120}{240} = 0,5 \text{ A.}$$

Analicemos el caso cuando los conductores que van hacia la lámpara de incandescencia han sido cerrados mediante una resistencia

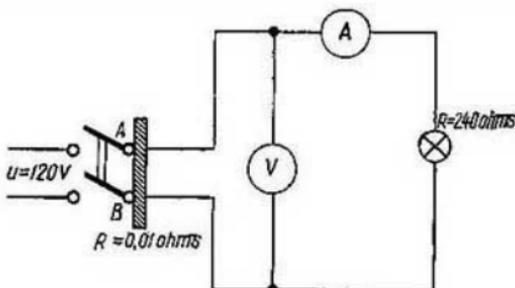


Fig. 39. Cortocircuito en los bornes de un interruptor de cuchilla

muy pequeña, por ejemplo, mediante una gruesa barra metálica que ha unido por casualidad los dos conductores. En este caso la corriente de la red al llegar al punto A se bifurca: la mayor parte pasará por la barra metálica, es decir, por el camino de pequeña resistencia, y el resto de la corriente pasará por el camino que posee una mayor resistencia, por la lámpara de incandescencia.

Determinemos la corriente que fluye por la barra metálica, si su resistencia $R = 0,01 \Omega$:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{0,01} = 12.000 \text{ A.}$$

En realidad, en el caso de cortocircuito, la tensión de la red eléctrica será menor que 120 V, ya que la corriente mayor creará en la red una gran caída de tensión y por eso la corriente que fluye por la barra metálica tampoco tendrá 12.000 A. Pero, a pesar de todo, esta corriente será muchas veces mayor que la corriente que consumía antes la lámpara de incandescencia.

La corriente, pasando por el conductor, desprende calor y lo calienta. En nuestro ejemplo la sección de los conductores del circuito eléctrico ha sido calculada para una corriente de 0,5 A. Al cerrar los cables, por el circuito fluirá una corriente muy grande, de 12.000 A. Esta corriente origina el desprendimiento de gran cantidad de calor que producirá el calentamiento, carbonización o fusión del aislamiento de los conductores, el deterioro de los instrumentos de medición, la fusión de los contactos de los interruptores de cuchilla, de los conmutadores, etc. La fuente de corriente que alimenta el circuito se puede deteriorar también. El recalentamiento de los conductores puede provocar un incendio.

Cada circuito eléctrico se calcula para una corriente normal, adecuada a éste.

El circuito en el que la resistencia disminuye y la corriente aumenta bruscamente, en comparación con la normal, se denomina **c o r t o c i r c u i t o**.

Teniendo en cuenta las peligrosas consecuencias, destructivas y a veces irremediables del cortocircuito, es necesario observar ciertas precauciones durante el montaje y el servicio de las instalaciones eléctricas. De ellas, las principales son:

1) el aislamiento de los cables ha de corresponder a su función (a la tensión de la red y a las condiciones de su servicio);

2) la sección de los cables debe ser tal, que su calentamiento en las condiciones reales del servicio no alcance una magnitud peligrosa;

3) los cables tendidos han de tener protección segura contra los deterioros mecánicos;

4) los cables deben ser colocados sobre aisladores que tengan suficiente resistencia mecánica y rigidez dieléctrica;

5) tanto los puntos de conexión y derivación, como los cables deben tener aislamiento seguro;

6) los cruces de cables han de ser hechos de tal modo que no se toquen unos con otros;

7) al pasar a través de las paredes, techo y piso, los cables deben estar protegidos contra la humedad, deterioros mecánicos y químicos y quedar bien aislados.

Para evitar el aumento repentino y peligroso de la corriente, en caso de cortocircuito, la red eléctrica se protege con fusibles, que consisten en trozos de alambre de punto de fusión muy bajo, conectados en serie a ésta. Al aumentar la corriente, por encima de una magnitud determinada, el fusible se calienta y se funde y,

como resultado de esto, el circuito se interrumpe y la corriente cesa. Se da una descripción más detallada de los fusibles en el § 54.

§ 25. Segunda ley de Kirchhoff. Aplicación de las leyes de Kirchhoff para calcular los circuitos eléctricos

Al calcular los circuitos eléctricos nos encontramos frecuentemente con los que forman circuitos cerrados. En estos circuitos, además de las resistencias, pueden incluirse también las fuerzas electromotrices. En la fig. 40 se muestra un sector de un circuito eléctrico complejo.

La polaridad de todas las fuerzas electromotrices es conocida. Elegimos a voluntad las direcciones positivas de las corrientes.

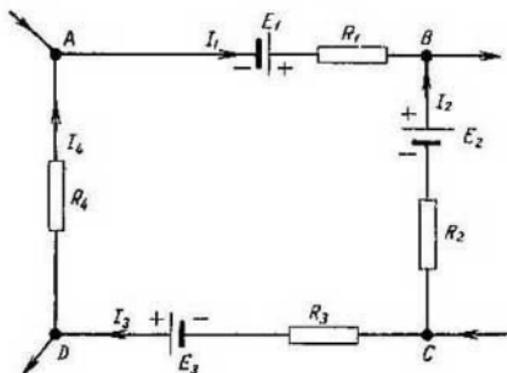


Fig. 40. Sector de un circuito eléctrico complejo

Recorremos el circuito eléctrico desde el punto A en cualquier dirección, por ejemplo, en sentido de las manecillas del reloj. Analicemos el trozo del circuito AB . En este brazo del circuito tiene lugar una caída de tensión (la corriente fluye del punto de mayor potencial al de menor potencial).

En el brazo del circuito AB se tiene:

$$\varphi_A + E_1 - I_1 R_1 = \varphi_B.$$

En el brazo del circuito BC :

$$\varphi_B - E_2 - I_2 R_2 = \varphi_C.$$

En el brazo del circuito CD :

$$\varphi_C - I_3 R_3 + E_3 = \varphi_D.$$

En el brazo del circuito DA :

$$\varphi_D - I_4 R_4 = \varphi_A.$$

Sumando los miembros de las cuatro ecuaciones mencionadas, obtendremos:

$$(\varphi_A + E_1 - I_1 R_1) + (\varphi_C - E_2 - I_2 R_2) + (\varphi_C - I_3 R_3 + E_3) + \\ + (\varphi_D - I_4 R_4) = \varphi_B + \varphi_C + \varphi_D + \varphi_A,$$

es decir,

$$E_1 - I_1 R_1 - E_2 - I_2 R_2 - I_3 R_3 + E_3 - I_4 R_4 = 0.$$

Trasladando los factores IR al miembro de la derecha, tendremos:

$$E_1 - E_2 + E_3 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4.$$

Generalizado:

$$\Sigma E = \Sigma IR.$$

Esta expresión representa la segunda ley de Kirchhoff. La fórmula muestra que *en todo circuito cerrado la suma algebraica de todas las*

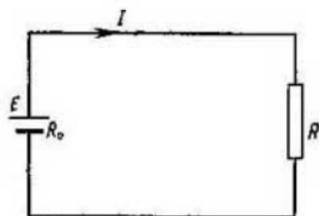


Fig. 41. Circuito cerrado simple

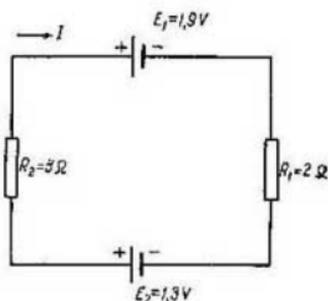


Fig. 42. Circuito eléctrico: para el ejemplo 31

fuerzas electromotrices es igual a la suma algebraica de las caídas de tensión.

Estudiemos ahora un circuito cerrado sencillo (fig. 41).

De acuerdo con la segunda ley de Kirchhoff

$$\Sigma E = \Sigma IR;$$

de donde

$$E = IR_0 + IR = I(R_0 + R),$$

de lo que se deduce que:

$$I = \frac{E}{R_0 + R}.$$

Hemos obtenido la fórmula de la ley de Ohm para todo el circuito.

Vamos a resolver algunos ejemplos aplicando la Ley de Ohm y las dos leyes de Kirchhoff.

Ejemplo 31. Se da un circuito eléctrico (fig. 42). Determinar su corriente. La dirección positiva de la corriente se elige a voluntad. Pasando por el circuito en el sentido de las manecillas del reloj, apliquemos la ecuación de la segunda ley de Kirchhoff:

$$-E_1 + E_2 = IR_1 + IR_2; \quad -1,9 + 1,3 = I(2 + 3); \quad -0,6 = 5I; \quad I = -0,12 \text{ A.}$$

El signo «menos» significa que el sentido elegido de la corriente es contrario a su dirección verdadera.

Ejemplo 32. Se da un circuito eléctrico (fig. 43). Determinar las corrientes en diversas partes del circuito. Los sentidos positivos de las corrientes se eligen a voluntad.

Para el circuito *abef*,

$$6 = 2I_1 + 5I_3. \quad (1)$$

Para el circuito *acdf*,

$$6 - 2 = 2I_1 - 4I_2; \quad 2 = I_1 - 2I_2. \quad (2)$$

Para el punto *b*, según la primera ley de Kirchhoff

$$I_3 = I_1 + I_2. \quad (3)$$

Tenemos tres ecuaciones con tres incógnitas. Resolviéndolas, encontramos el valor y la dirección de las corrientes.

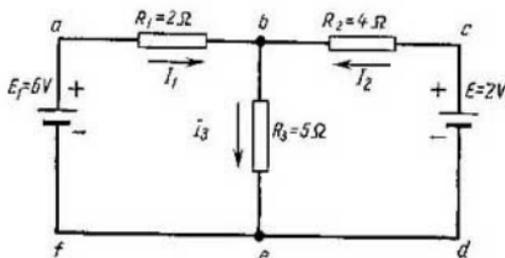


Fig. 43. Circuito eléctrico: para el ejemplo 32

Reemplazando el valor de la corriente I_3 de la ecuación (3) en la ecuación (1) tenemos:

$$6 = 2I_1 + 5I_1 + 5I_2 = 7I_1 + 5I_2.$$

Sumando a esta ecuación la ecuación (2), tenemos:

$$\begin{aligned} 6 &= 7I_1 + 5I_2 \\ + 2 &= I_1 - 2I_2 \end{aligned}$$

Multiplicando la ecuación (4) por 2, y la (2) por 5,

$$\begin{aligned} 12 &= 14I_1 + 10I_2 \\ + 10 &= 5I_1 - 10I_2. \end{aligned}$$

Sumando las últimas dos ecuaciones, tenemos

$$22 = 19I_1, \text{ de donde } I_1 = 1,156 \text{ A.}$$

Sustituyendo el valor de I_1 en la ecuación (1):

$$\begin{aligned} 6 &= 2 \cdot 1,156 + 5I_3; \\ I_3 &= \frac{6 - 2 \cdot 1,156}{5} = 0,74 \text{ A.} \end{aligned}$$

Sustituyendo el valor de I_1 en la ecuación (2):

$$2 = 1,156 - 2I_2$$

de donde

$$I_2 = \frac{-2 + 1,156}{2} = -0,422 \text{ A.}$$

El signo «menos» indica que la dirección verdadera de la corriente I_2 es contraria a la elegida por nosotros.

§ 26. Método de superposición

El método de superposición se emplea para calcular los circuitos eléctricos que tienen varias f.e.m. El método de superposición consiste en que la corriente en cualquier parte del circuito se puede

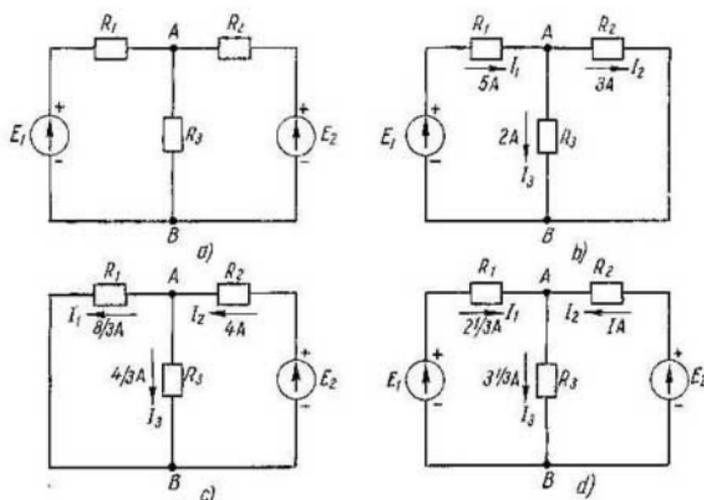


Fig. 44. Método de superposición: para el ejemplo 33

considerar compuesta de una serie de corrientes parciales procedentes de cada una de las f.e.m., mientras que las demás f.e.m. se consideran nulas.

Examinemos un ejemplo.

Ejemplo 33. (fig. 44, a). Datos conocidos:

$$E_1 = 27 \text{ V}, \quad E_2 = 24 \text{ V}, \quad R_1 = 3\Omega, \quad R_2 = 4\Omega, \quad R_3 = 6\Omega.$$

Determinar de qué manera se distribuyen las corrientes en el circuito.

Encontremos las corrientes creadas por la f. e. m. E_1 (la f.e.m. E_2 se considera nula) (fig. 44, b). Consideremos que las direcciones de la corriente son positivas; determinemos las resistencias de las partes del circuito y las corrientes en cada parte de éste. Las resistencias R_2 y R_3 están unidas en para-

lelo. Por eso la resistencia de la derivación es:

$$R_{2,3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{4 \cdot 6}{4 + 6} = 2,4 \Omega.$$

La resistencia total del circuito es igual a:

$$R = R_1 + R_{2,3} = 3 + 2,4 = 5,4 \Omega.$$

La corriente en el sector común del circuito:

$$I_1 = \frac{E_1}{R} = \frac{27}{5,4} = 5 \text{ A.}$$

La tensión entre los puntos *A* y *B* es igual a:

$$U_{AB} = E_1 - I_1 R_1 = 27 - 5 \cdot 3 = 12 \text{ V.}$$

Las corrientes en las ramas paralelas:

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{R_2} = \frac{12}{4} = 3 \text{ A;}$$

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{R_3} = \frac{12}{6} = 2 \text{ A.}$$

Comprobación:

$$I_2 + I_3 = 3 + 2 = 5 \text{ A} = I_1.$$

Hallemos las corrientes creadas por la f. e. m. E_2 (la f.e.m. E_1 se considera nula) (fig. 44.c). Consideramos positivas las direcciones de las corrientes, determinamos las resistencias de las partes del circuito y las corrientes en cada parte de éste.

$$R_{1,3} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = \frac{3 \cdot 6}{3 + 6} = 2 \Omega;$$

$$R = R_2 + R_{1,3} = 4 + 2 = 6 \Omega;$$

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{R} = \frac{24}{6} = 4 \text{ A;}$$

$$U_{AB} = E_2 - I_2 R_2 = 24 - 4 \cdot 4 = 8 \text{ V;}$$

$$I_1 = \frac{U_{AB}}{R_1} = \frac{8}{3} \text{ A;}$$

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{R_3} = \frac{8}{6} = \frac{4}{3} \text{ A.}$$

Comprobación:

$$I_1 + I_3 = \frac{8}{3} + \frac{4}{3} = 4 \text{ A} = I_2.$$

Tabla 6

Corriente del sector	Fig. 44, b	Fig. 44, c	Corriente verdadera y su dirección
I_1	A la derecha, 5 A	A la izquierda, $8/3$ A	A la derecha, $7/3$ A
I_2	A la derecha, 3 A	A la izquierda, 4 A	A la izquierda, 4 A
I_3	Hacia abajo, 2 A	Hacia abajo, $4/3$ A	Hacia abajo, $10/3$ A

Comparando los últimos dos esquemas (fig. 44, b y c), vemos que en cada parte del circuito (cada derivación) fluyen dos corrientes. Verificando la suma algebraica de estas corrientes (tabla 6) obtendremos la corriente verdadera del sector dado del circuito.

Comprobación:

De acuerdo con la primera ley de Kirchoff para el punto A tenemos

$$I_1 + I_2 + I_3 = \frac{7}{3} + 1 - \frac{10}{3} = 0.$$

La distribución de la corriente según el esquema representado en la fig. 44, a, se da en la fig. 44, d.

§ 27. Método de la tensión del punto de derivación

En la práctica se encuentran circuitos que tienen solamente dos puntos de derivación. Entre los puntos de derivación pueden ser conectadas cualquier cantidad de derivaciones. El cálculo de estos circuitos se simplifica considerablemente si se aplica el método de la tensión del punto de derivación.

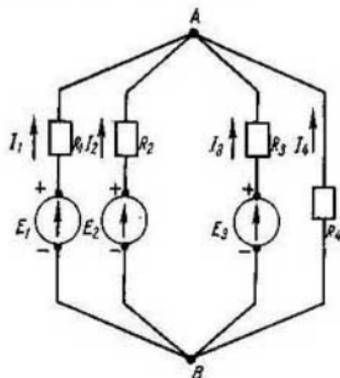


Fig. 45. Método de la tensión del punto de derivación

Veamos este método. En la fig. 45 se muestra un circuito eléctrico con dos puntos de derivación A y B, entre los cuales están conectadas cuatro derivaciones paralelas. Las tres primeras tienen fuentes de corriente (generadores) con f.e.m. E_1 , E_2 y E_3 . En serie con los generadores están intercaladas las resistencias R_1 , R_2 y R_3 (en ellas pueden incluirse también las resistencias interiores de los generadores). En la última derivación está intercalada la resistencia R_4 .

Las direcciones positivas de las corrientes en cada derivación se han elegido del punto B al punto A. Puesto que en las primeras tres derivaciones la dirección de las corrientes ha coincidido con la de las f.e.m. de las fuentes de corriente, éstas últimas trabajan como generadores.

Si la tensión entre los puntos A y B la designamos con U , la corriente en la primera derivación será:

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_1} = (E_1 - U) G_1,$$

es decir,

$$I_1 = (E_1 - U) G_1;$$

por analogía, para las demás derivaciones:

$$I_2 = (E_2 - U) G_2;$$

$$I_3 = (E_3 - U) G_3;$$

$$I_4 = (0 - U) G_4 = -UG_4.$$

Aplicando para el punto A la primera ley de Kirchoff, tendremos:

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0.$$

Sustituyendo las corrientes por sus expresiones, escribimos la última ecuación del modo siguiente:

$$(E_1 - U) G_1 + (E_2 - U) G_2 + (E_3 - U) G_3 - UG_4 = 0,$$

de donde

$$U = \frac{E_1 G_1 + E_2 G_2 + E_3 G_3}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4}.$$

Hemos obtenido la fórmula de la tensión del punto de derivación.

En el numerador de derivaciones tenemos la suma algebraica de los productos de las f.e.m. de las derivaciones por las conductancias de éstas. En el denominador se da la suma de conductancias de todas las derivaciones. Si la f.e.m. de cualquier derivación tiene dirección contraria a la que se indica en la fig. 45, esta f.e.m. entra en la fórmula con el signo «menos».

En forma general, se puede anotar la fórmula de la tensión del punto de derivación del modo siguiente:

$$U = \frac{\sum EG}{\sum G}.$$

Empleando la fórmula resolvamos el siguiente ejemplo.

Ejemplo 34. Para el circuito, presentado en la fig. 45, se dan las f.e.m. de los generadores $E_1 = 110$ V, $E_2 = 115$ V, $E_3 = 120$ V; las resistencias interiores de los generadores son: $R_{01} = 0,2\Omega$; $R_{02} = 0,1\Omega$; $R_{03} = 0,3\Omega$. Las resistencias de las derivaciones son: $R_1 = 2,3\Omega$; $R_2 = 4,9\Omega$; $R_3 = 4,7\Omega$; $R_4 = 5\Omega$. Determinar las corrientes en las derivaciones.

Solución.

Primero determinamos la conductancia de cada rama:

$$G_1 = \frac{1}{R_{01} + R_1} = \frac{1}{0,2 + 2,3} = \frac{1}{2,5} = 0,4 \text{ mhos};$$

$$G_2 = \frac{1}{R_{02} + R_2} = \frac{1}{0,1 + 4,9} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ mhos};$$

$$G_3 = \frac{1}{R_{03} + R_3} = \frac{1}{0,3 + 4,7} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ mhos};$$

$$G_4 = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ mhos}.$$

La tensión del punto de derivación será:

$$U = \frac{E_1 G_1 + E_2 G_2 + E_3 G_3}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4} = \frac{110 \cdot 0,4 + 115 \cdot 0,2 + 120 \cdot 0,2}{0,4 + 0,2 + 0,2 + 0,2} = 91 \text{ V}.$$

Las corrientes en las derivaciones serán:

$$I_1 = (E_1 - U) G_1 = (110 - 91) \cdot 0,4 = 7,6 \text{ A};$$

$$I_2 = (E_2 - U) G_2 = (115 - 91) \cdot 0,2 = 4,8 \text{ A};$$

$$I_3 = (E_3 - U) G_3 = (120 - 91) \cdot 0,2 = 5,8 \text{ A};$$

$$I_4 = -U G_4 = -91 \cdot 0,2 = -18,2 \text{ A}.$$

El signo «menos» de la corriente I_4 indica que el sentido verdadero de la corriente es contrario al dado en la Fig. 45.

Veamos el funcionamiento de dos generadores de excitación en derivación con igual f.e.m. ($E_1 = E_2$) y resistencias ($R_{01} = R_{02}$). El esquema de conexión de los generadores se muestra en la fig. 45. Sean $E_1 = E_2 = 110 \text{ V}$, $R_{01} = R_{02} = 0,2 \Omega$. La resistencia del consumidor $R_3 = 1 \Omega$. Determinar la potencia que desarrollan los generadores.

Aplicando la fórmula de la tensión del punto de derivación tendremos:

$$U = \frac{E_1 G_1 + E_2 G_2}{G_1 + G_2 + G_3} = \frac{2 \cdot 110 \cdot \frac{1}{0,2}}{\frac{1}{0,2} + \frac{1}{0,2} + 1} = 100 \text{ V}.$$

Las intensidades de las corrientes de los generadores son:

$$I_1 = (E_1 - U) G_1 = (110 - 100) \cdot \frac{1}{0,2} = 50 \text{ A}; \quad I_2 = 50 \text{ A}.$$

Las potencias que crean los generadores:

$$P_1 = E_1 I_1 = 100 \cdot 50 = 5.500 \text{ W}; \quad P_2 = 5.500 \text{ W}.$$

Del ejemplo citado se deduce que si son iguales las f.e.m. y las resistencias interiores de los generadores, las potencias que suministran éstos al circuito son también iguales. Supongamos ahora que la f.e.m. del segundo generador E_2 es igual a 121 V. En este caso la tensión del punto de derivación es

$$U = \frac{100 \cdot \frac{1}{0,2} + 121 \cdot \frac{1}{0,2}}{\frac{1}{0,2} + \frac{1}{0,2} + 1} = 105 \text{ V}.$$

Las intensidades de las corrientes de los generadores son:

$$I_1 = (110 - 105) \frac{1}{0,2} = 25 \text{ A};$$

$$I_2 = (121 - 105) \frac{1}{0,2} = 80 \text{ A}.$$

La intensidad de la corriente del consumidor es:

$$I_3 = \frac{105}{1} = 105 \text{ A}.$$

Las potencias creadas por los generadores son:

$$P_1 = 110 \cdot 25 = 2.750 \text{ W}; \quad P_2 = 121 \cdot 80 = 9.680 \text{ W}.$$

Por lo tanto, al funcionar paralelamente los generadores de corriente continua, con iguales resistencias interiores, resultará más cargado el generador cuya f.e.m. es mayor.

Veamos, por último, el caso cuando son iguales las f.e.m. de los generadores que funcionan en paralelo, pero sus resistencias interiores son diferentes.

Ejemplo 35. Se dan: las f.e.m. de los generadores $E_1 = E_2 = 110 \text{ V}$, las resistencias interiores de éstos: $R_{01} = 0,2\Omega$ y $R_{02} = 0,25\Omega$, la resistencia exterior del circuito $R = 1\Omega$. Determinar la intensidad de las corrientes de los generadores.

Primero calculamos la tensión del punto de derivación:

$$U = \frac{100 \frac{1}{0,2} + 110 \frac{1}{0,25}}{\frac{1}{0,2} + \frac{1}{0,25} + 1} = 99 \text{ V}.$$

Las intensidades de las corrientes de los generadores son:

$$I_1 = (110 - 99) \frac{1}{0,2} = 55 \text{ A};$$

$$I_2 = (110 - 99) \frac{1}{0,25} = 44 \text{ A}.$$

La intensidad de la corriente de carga es:

$$I_3 = \frac{99}{1} = 99 \text{ A}.$$

Al funcionar paralelamente los generadores de corriente continua, con igual f.e.m., pero con resistencias interiores diferentes, resulta más cargado el generador que tiene resistencia interior menor.

§ 28. Método de las corrientes de circuito

El método de las corrientes de circuito se emplea para calcular los circuitos eléctricos complejos que tienen más de dos puntos de derivación. En la fig. 46, a se muestra semejante circuito eléctrico.

Este comprende tres circuitos. Uno de ellos, el circuito medio, tiene derivaciones que son partes componentes de los dos circuitos vecinos, así como derivaciones que entran solamente en un circuito.

La esencia del método de las corrientes de circuito consiste en la suposición de que cada circuito tiene corriente propia (es decir, corriente de circuito). De este modo, en las derivaciones comunes, situadas en el límite de dos circuitos vecinos, fluirá una corriente igual a la suma algebraica de las corrientes de estos circuitos.

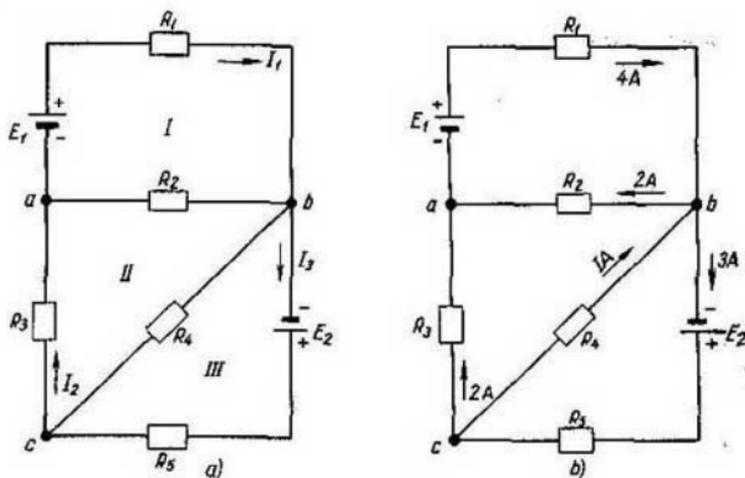


Fig. 46. Método de las corrientes de circuito

Elijamos las direcciones positivas de las tres corrientes de circuito del modo indicado por las flechas de la figura. Luego apliquemos la ecuación de la segunda ley de Kirchhoff, orientando los tres circuitos en una dirección, por ejemplo, en sentido de las manecillas del reloj.

La ecuación para el circuito I será:

$$E_1 - I_1 R_1 - (I_1 - I_2) R_2. \quad (a)$$

Para el circuito II:

$$0 = I_2 R_3 + (I_2 + I_1) R_2 + (I_2 - I_3) R_4. \quad (b)$$

Para el circuito III:

$$E_2 = I_3 R_5 + (I_3 - I_2) R_4. \quad (c)$$

Como vemos, el número de ecuaciones es igual al de los circuitos. Resolviendo el sistema de ecuaciones, encontramos las corrientes de circuito por las cuales se determinan las corrientes en las derivaciones de los conductores.

Ejemplo 36. Determinar de qué modo se distribuyen las corrientes en el circuito representado en la fig. 46, a, si $E_1 = 14$ V, $E_2 = 20$ V, $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 3\Omega$, $R_3 = 4\Omega$, $R_4 = 2\Omega$, $R_5 = 6\Omega$.

S o l u c i ó n.

La ecuación para el circuito I según la fórmula (a) será:

$$\begin{aligned} 14 &= I_1 2 + (I_1 - I_2) 3, \\ 14 &= 2I_1 + 3I_1 - 3I_2, \\ 14 &= 5I_1 - 3I_2. \end{aligned} \tag{a'}$$

La ecuación para el circuito II según la fórmula (b) será:

$$\begin{aligned} 0 &= I_2 4 + (I_2 - I_1) 3 + (I_2 - I_3) 2, \\ 0 &= 4I_2 + 3I_2 - 3I_1 + 2I_2 - 2I_3, \\ 0 &= 9I_2 - 3I_1 - 2I_3. \end{aligned} \tag{b'}$$

La ecuación para el circuito III según la fórmula (c) será:

$$\begin{aligned} 20 &= 6I_3 + (I_3 - I_2) 2, \\ 20 &= 6I_3 + 2I_3 - 2I_2, \\ 20 &= 8I_3 - 2I_2, \\ 10 &= 4I_3 - I_2. \end{aligned} \tag{c'}$$

Sumando las ecuaciones (a') y (b'), tenemos:

$$\begin{aligned} 14 &= 5I_1 - 3I_2 \\ + \quad 0 &= 9I_2 - 3I_1 - 2I_3 \end{aligned}$$

o bien,

$$\begin{aligned} 42 &= 15I_1 - 9I_2 \\ + \quad 0 &= 45I_2 - 15I_1 - 10I_3 \\ \hline 42 &= 36I_2 - 10I_3 \end{aligned} \tag{d}$$

Sumando las fórmulas (c') y (d), tenemos:

$$\begin{aligned} 10 &= 4I_3 - I_2 \\ + \quad 42 &= 36I_2 - 10I_3 \end{aligned}$$

o bien,

$$\begin{aligned} 50 &= 20I_3 - 5I_2 \\ + \quad 84 &= 72I_2 - 20I_3 \\ \hline 134 &= 67I_2, \text{ de donde } I_2 = \frac{134}{67} = 2 \text{ A.} \end{aligned}$$

Sustituyendo el valor de la corriente I_2 en la ecuación (c') tenemos:

$$\begin{aligned} 10 &= 4I_3 - 2, \\ 10 + 2 &= 4I_3, \end{aligned}$$

de donde

$$I_3 = \frac{12}{4} = 3 \text{ A.}$$

Sustituyendo el valor de la corriente I_2 en la ecuación (a') tenemos:

$$14 = 5I_1 - 6,$$

$$20 = 5I_1,$$

de donde

$$I_1 = \frac{20}{5} = 4 \text{ A.}$$

De este modo han sido halladas todas las corrientes de circuito.

Las corrientes en los sectores aislados del circuito las determinamos algebraicamente, sumando las corrientes de circuito que fluyen por éstos. La distribución de corriente en las derivaciones aisladas del circuito se indica en la fig. 46,b.

§ 29. Conductores metálicos

Según las concepciones modernas, el cristal de un metal sólido o líquido consta de iones positivos y electrones libres. Los iones del metal se sitúan a una distancia igual unos de otros y forman una figura regular de red cristalina espacial. En el interior de la red, a semejanza de las moléculas del gas en el aire, se mueven desordenadamente los electrones libres. En una red cristalina regular e ideal de un metal, los electrones se desplazarían del mismo modo que en el vacío. Sin embargo, la inclusión de cuerpos extraños que deforman la red, así como el movimiento térmico de los átomos del metal obstaculizan el desplazamiento de los electrones. Una parte de los electrones de los átomos del metal, al abandonar sus órbitas, puede encontrarse en el campo de otros átomos y, chocando contra otros electrones, desalojarlos de sus órbitas, lo que provocará la formación de nuevos electrones libres.

En el § 2 se ha dicho que los electrones en los átomos tienen ciertos valores de energía enteramente determinados (niveles de energía). Las bandas llenas y vacías de la mayoría de los metales se sobrecubren y entre ellas no hay zona prohibida. Por eso, los electrones del metal pasan fácilmente de la banda llena a la vacía, lo que condiciona la gran conductividad de los metales. Si se aplica una fuerza electromotriz a los extremos del conductor, por efecto del campo eléctrico, los electrones libres del metal obtendrán una velocidad adicional. Con el aumento de la intensidad del campo, una parte cada vez mayor de electrones, que se hallaban en movimiento desordenado, participarán en el movimiento orientado, surgiendo en el conductor una corriente eléctrica. En su movimiento los electrones chocan contra los átomos y moléculas del metal y les transmiten una parte de su energía cinética, aumentando su movimiento térmico. Como resultado de esto, la temperatura del conductor se eleva. Ya se ha indicado, que el movimiento térmico de las partículas del metal obstaculiza el desplazamiento de electrones. Por consiguiente, al elevarse la temperatura del conductor su resistencia eléctrica aumenta. La presencia de impurezas provoca también el aumento de la resistencia del conductor. Se puede suponer

que la resistencia de los metales puros a la temperatura de cero absoluto (-273°C) debe ser igual a cero, surgiendo entonces el fenómeno que se llama superconductividad.

§ 30. Características principales de los materiales conductores de la corriente

Las características principales de los materiales conductores son:

1. La resistencia eléctrica específica (resistividad).
2. El coeficiente térmico.
3. La conductividad térmica.
4. La diferencia de potencial entre los contactos, y la fuerza termoelectromotriz.
5. La resistencia temporal a la ruptura, y el alargamiento relativo durante la extensión.

1. La resistencia eléctrica específica ρ es una magnitud que caracteriza la capacidad del material de ofrecer resistencia a la corriente eléctrica y se expresa con la fórmula:

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

Para los conductores largos (cables, cordones, almas de cables, barras) la longitud l se expresa generalmente en metros, el área de la sección transversal S , en mm^2 , la resistencia del conductor R , en ohmios; por consiguiente, la resistencia específica se mide en:

$$\rho = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}.$$

Los datos sobre las resistencias específicas de diversos conductores metálicos se dan en la tabla 7.

2. El coeficiente térmico α es la magnitud que caracteriza la variación de la resistencia del conductor en función de la temperatura.

El valor medio del coeficiente térmico en el intervalo de temperaturas $t_2 - t_1$, puede ser hallado por medio de la fórmula:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 (t_2 - t_1)} \frac{1}{\text{grado}}.$$

Los datos sobre el coeficiente térmico de diversos materiales conductores se dan en la tabla 7.

3. La conductividad térmica λ es una magnitud que caracteriza la cantidad de calor que pasa en una unidad de tiempo a través de una capa de la substancia. La conductividad térmica se expresa en $\lambda = \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{grado}}$. La conductividad térmica tiene gran significación en los cálculos térmicos de las máquinas, aparatos, cables y otros dispositivos electrotécnicos.

**Valor de la conductividad térmica λ
para algunos materiales**

		$\frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{grado}}$
Plata	350-360	Idem
Cobre	340	Idem
Aluminio	180-200	» »
Latón	90-100	» »
Hierro, acero	40-50	» »
Bronce	30-40	» »
Hormigón	0,7-1,2	» »
Ladrillo	0,5-1,2	» »
Vidrio	0,6-0,9	» »
Amianto	0,13-0,18	» »
Madera	0,1-0,15	» »
Corcho	0,04-0,08	» »

De los valores dados se ve que la mayor conductividad térmica corresponde a los metales. La conductividad térmica de los materiales no metálicos es mucho menor. Esta se reduce hasta valores mínimos en los materiales porosos, que se emplean especialmente para aislamiento térmico. Según la teoría electrónica, la alta conductividad térmica de los metales se debe a los mismos electrones que conducen la electricidad.

4. La diferencia de potencial entre los contactos, y la fuerza termoelectromotriz.

Como se ha indicado antes, los iones positivos del metal están dispuestos en los nudos de la red cristalina formando su armazón. Los electrones libres llenan la red a semejanza del gas, que a veces se llama «gas electrónico». La presión del gas electrónico dentro del metal es proporcional a la temperatura absoluta y al número de electrones libres en la unidad de volumen, lo que, a su vez, depende de las propiedades del metal. Al ser unidos dos metales distintos, en los puntos de contacto se efectúa la nivelación de presión del gas electrónico.

Como resultado de la difusión de los electrones, el metal, cuyo número de electrones disminuye, se carga positivamente, y el metal, cuyo número de electrones aumenta, se carga negativamente. En el punto de contacto surge una diferencia de potencial. Esta diferencia es proporcional a la diferencia de temperatura de los metales y depende de su clase. En el circuito cerrado surge una corriente termoelectrónica. La f.e.m. que crea esta corriente se llama *fuerza termoelectromotriz* (f.t.e.m.).

El fenómeno de la diferencia de potencial entre los contactos se utiliza en la técnica para medir la temperatura mediante termopares (véase el § 56). Al medir intensidades y tensiones pequeñas en los puntos de unión de metales diferentes, puede surgir una gran diferencia de potencial en el circuito, que alterará los resultados de las

mediciones. En este caso es necesario elegir los materiales de tal modo que la medición sea muy exacta.

5. Resistencia temporal a la ruptura, y alargamiento relativo durante la extensión.

Al elegir los conductores, además de su sección transversal, material de que están hechos y el aislamiento, es necesario tener en cuenta su resistencia mecánica. Sobre todo, esto se refiere a los cables usados en las líneas de transmisión eléctrica aérea, ya que los mismos sufren estiramientos. Por efecto de la fuerza aplicada al material, éste se alarga. Si se designa la longitud inicial con l_1 y la longitud final con l_2 , la diferencia $l_2 - l_1 = \Delta l$ se llama a l a r g a m i e n t o a b s o l u t o.

La relación $\frac{l_2 - l_1}{l_1} = \frac{\Delta l}{l_1} = \varepsilon$ se denomina a l a r g a m i e n t o r e l a t i v o.

La fuerza que provoca la ruptura del material se llama c a r g a d e r o t u r a y la relación entre esta carga y la sección transversal del material en el momento de rotura se llama r e s i s t e n c i a l í m i t e a l a r u p t u r a y se designa $\rho_r \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$. Los datos sobre las resistencias límite a la ruptura para diferentes materiales conductores de corriente se dan en la tabla 7.

§ 31. Materiales conductores

En la electrotecnia moderna se utilizan conductores sólidos, líquidos y en determinadas condiciones, gaseosos. Los metales son conductores sólidos. Los electrólitos y metales fundidos son conductores líquidos. Los gases conductores se utilizan en instrumentos iónicos.

Los conductores metálicos se pueden dividir en dos grupos: materiales de alta conductividad y materiales de alta resistencia. Al primer grupo de materiales corresponden los metales químicamente puros: cobre y aluminio, que sirven para producir conductores, cables, devanados de máquinas eléctricas y transformadores. Son buenos conductores algunas aleaciones, como bronce y latón; diferentes aleaciones de aluminio y acero, y se emplean en la práctica debido a su poco costo en comparación con los metales puros, así como también a sus propiedades mecánicas.

Los metales y aleaciones de alta resistencia que se emplean en los instrumentos electrotécnicos, lámparas de incandescencia, reóstatos, etc. pertenecen al segundo grupo de materiales.

Paralelamente con los metales y sus aleaciones, en la práctica se emplean algunos carbones en los instrumentos de alumbrado (reflectores), dispositivos para conmutación de la corriente en las máquinas eléctricas (escobillas), en electrometalurgia (electrodos), en aparatos de comunicación (carbón de micrófonos).

§ 32. Materiales de alta conductividad

El **cobre** es el metal de mayor uso en la electrotecnia. Las ventajas que ofrece son: pequeña resistencia específica ($\rho = 0,0172 - 0,0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$); resistencia mecánica bastante grande (su resistencia límite a la ruptura es de 25 a 40 kgf/mm^2); estabilidad a la corrosión; buena maquinabilidad; fácil de estañar y de soldar.

En las ramas de la electrotecnia donde se requiere gran resistencia, mecánica, dureza y resistencia al desgaste, se utiliza cobre duro de la marca MT. Este se emplea para fabricar cables destinados a las líneas aéreas de transmisión eléctrica, conductores de contacto, barras colectoras de los dispositivos de distribución, delgas de colectores de las máquinas eléctricas. El cobre duro, calentado a la temperatura de 400 a 700°C y luego enfriado, se convierte en cobre dúctil. El cobre dúctil, marca MM, se utiliza para fabricar alambres de sección circular y rectangular, hilos de cables, devanados eléctricos.

En la electrotecnia se emplean también aleaciones a base de cobre: bronce y latón.

El **bronce** es una aleación de cobre, estaño, silicio, fósforo, berilio, cadmio y otros elementos químicos. Tiene mayor resistencia mecánica y dureza que el cobre (la resistencia a la ruptura del alambre de bronce es de 80 a 135 kgf/mm^2).

El bronce tiene una conductividad eléctrica menor que el cobre (de 10 a 95% respecto al cobre).

El **latón** es una aleación de 50 a 70% de cobre y de 30 a 50% de zinc, y se emplea como material de construcción. El latón es trabajado con facilidad por corte y se utiliza para fabricar piezas mediante el estirado y estampado.

El **aluminio** ocupa el tercer lugar por su conductividad eléctrica después de la plata y el cobre ($\rho = 0,029 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$).

El aluminio es también inferior en cualidades mecánicas al cobre. El aluminio dúctil marca AM tiene una resistencia a la ruptura solamente de 8 a 9 kgf/mm^2 ; el aluminio duro no recocido, de marca AT, llega a 18 kgf/mm^2 de resistencia a la ruptura. Para aumentar la resistencia mecánica del aluminio, se alea con silicio, hierro y magnesio. Para los cables de las líneas aéreas se utiliza una de estas aleaciones: aldrey (0,3—0,5% de magnesio; 0,4—0,7% de silicio; 0,2—0,3% de hierro, y el resto, aluminio). La resistencia a la ruptura del aldrey es de 35 kgf/mm^2 . En las líneas de transmisión se emplean también los cables a base de aluminio y acero, cuya alma está torcida de hilos de acero. Por afuera el alma de acero está envuelta con alambre de aluminio. En la electrotecnia el aluminio se utiliza para fabricar conductores, barras de sección circular y rectangular, hojas de aluminio para condensadores y envolturas de algunos tipos de cables.

El **acero** ofrece gran resistencia mecánica. El acero usado para conductores contiene de 0,10 a 0,15% de carbono y su resistencia

a la ruptura es de 70 a 75 kgf/mm². La resistencia específica del acero es de cerca de 0,1Ω·mm²/m, es decir, la conductividad del acero es de 6 a 7 veces menor que la del cobre. A diferencia del cobre y del aluminio, el acero es un material más barato y más difundido. La baja resistencia a la corrosión es una cualidad negativa del acero. Para preservarlo contra este fenómeno lo recubren con un metal más resistente a la corrosión (por ejemplo, con zinc). Dado que el acero pertenece al grupo de materiales ferromagnéticos, al circular la corriente alterna por un conductor de este material tiene lugar el fenómeno que se llama efecto pelicular (véase el § 87). Esto se manifiesta en que la resistencia activa del conductor es mayor para la corriente alterna que para la corriente continua. Por esto, partiendo de las condiciones de máximo calentamiento de los conductores, es necesario usar para los conductores y barras colectoras una corriente alterna menor que la corriente continua. Además, en un conductor de acero, conectado al circuito de corriente alterna, tiene lugar una pérdida de potencia por histéresis (véase el § 63).

El acero se emplea también en electrotecnia para fabricar cables, barras colectoras, circuitos a tierra y raíles para tranvías y ferrocarriles eléctricos.

Con el fin de economizar el cobre, se utilizan conductores bimetálicos. El interior del conductor es de acero, y con el cobre se reviste exteriormente por métodos térmico o galvánico. Ambos metales forman un conductor monolítico. El cobre constituye el 50% del peso del conductor. La resistencia a la ruptura de un conductor bimetálico es de 55 a 70 kgf/mm².

§ 33. Metales empleados en la electrotecnia

El plomo es un metal blando, dúctil, de color gris. Su resistencia a la ruptura es igual a 1,6 kgf/mm². Es estable contra la acción del agua, los ácidos clorhídrico y sulfúrico. A la atmósfera, el plomo se cubre con una película fina de óxido que lo protege contra la oxidación. Los ácidos nítrico y acético, las substancias orgánicas en putrefacción, la cal y el hormigón recién preparados destruyen el plomo. El plomo se emplea en cubiertas protectoras de cables y conductores, así como para preparar las placas de acumuladores de plomo. El plomo y sus compuestos son tóxicos.

El estaño es un metal blando de color blanco plateado. No se corroe por el aire ni por el agua, pero los ácidos diluidos actúan lentamente sobre éste. El estaño se emplea para formar una película superficial sobre el hierro con el fin de protegerlo contra la herrumbre (hojalata). Las hojas de estaño finamente laminadas se usan para preparar condensadores. El estaño entra como parte componente en el bronce, metales antifricción (babbitts) y aleaciones para soldar.

El volframo (tungsteno) es un metal sólido de color blanco plateado, que se obtiene por medio de tratamiento químico

complejo de la mena enriquecida (volframita). Como resultado del tratamiento se obtiene un polvo de volframio puro, que a la presión, de hasta 2.000 at, se prensa en cubitos que luego se calientan hasta 700°C. Con esto, los granos de polvo de volframio se sinterizan y se forma un metal sólido. Del volframio se estiran alambres y se laminan hojas. Es el más refractario de todos los metales. Su temperatura de fusión es de $3.370 \pm 50^\circ\text{C}$. El volframio metálico se usa ampliamente en la fabricación de aparatos eléctricos al vacío: para hacer los filamentos de lámparas de incandescencia, válvulas electrónicas, anticátodos de los tubos de rayos X, etc.

El mercurio es un metal de color blanco plateado que a la temperatura ambiente se encuentra en estado líquido. El mercurio se emplea en la fabricación de los rectificadores de vapor de mercurio, lámparas de mercurio, contactos de mercurio. El mercurio, y, sobre todo, sus vapores, son tóxicos.

Las características principales de los metales y las aleaciones empleados en electrotecnia se dan en la tabla 7.

§ 34. Carbón electrotécnico

El carbón electrotécnico se obtiene del hollín, carbón de piedra, coque y grafito natural. La materia prima que sirve para la producción de artículos de carbón eléctrico se tritura, se tamiza y se mezcla con aglutinantes (alquitrán de hulla o vidrio líquido). La masa preparada se estira a través de una boquilla (para fabricar electrodos en forma de barras) o se prensa en formas especiales (para producir artículos de carbón de forma compleja). Luego, las piezas se someten a cocción a $800-3.000^\circ\text{C}$.

Las escobillas de las máquinas eléctricas sirven para crear el contacto por deslizamiento entre las partes móviles y fijas de las máquinas. Las superficies de contacto de las escobillas (superficie que presiona sobre los colectores) varían desde 4×4 mm hasta 35×35 mm. La altura de las mismas es de 12 a 70 mm. La industria produce varios tipos de escobillas: las de carbón y grafito (T y VT), de grafito (Г), de electrografito (ЭГ), de cobre y grafito (M y MT), de bronce y grafito (БГ).

§ 35. Aleaciones de alta resistencia

Las aleaciones de alta resistencia se dividen en tres grupos:

1. Aleaciones para cajas de resistencia, diferentes patrones, resistencias adicionales y shunts.
2. Aleaciones para resistencias y reóstatos.
3. Aleaciones para instrumentos electrotérmicos y hornos.

A las aleaciones del primer grupo se les exige lo siguiente: alta resistencia específica, coeficiente térmico cercano a cero, pequeña fuerza termoeléctromotriz en combinación con otros metales (sobre

Características principales de metales y aleaciones

Metales	Densidad, en g/cm ³	Temperatura de fusión, en °C	Límite de resistencia a la ruptura, en kg/mm ²	Resistencia eléctrica espe- cífica, en Ω·mm ² /m	Coefficiente térmico 1/°C	Empleo
1	2	3	4	5	6	7 *
Aluminio	2,69-2,7	657-660	8-25	0,026-0,028	0,00403-0,00429	Conductores, cables, barras colec- toras, hojas finas
Aldrey	2,7	1.100	30-38	0,029-0,032	0,0036-0,0038	Cables para líneas de alta tensión
Bronce	8,3-8,9	885-1.050	31-135	0,02-0,05	0,004	Contactos, muelles, cables de con- tacto
Volframio	19,3-20,0	3.370±50	193-300	0,053-0,055	0,004-0,005	Filamentos de lámparas de incan- descencia, electrodos de válvu- las, contactos
Oro	19,3	1063	—	0,022-0,023	0,0036	Contactos en aleaciones con plata
Latón	8,4-8,7	900-960	30-70	0,031-0,079	0,002	Contactos, bornes
Cobre	8,7-8,9	1.083	27-44,5	0,0172-0,0175	0,004	Conductores, cables, barras colec- toras
Molibdeno	10,2	2.570-2.630	86-250	0,048-0,054	0,0047-0,005	Aparatos eléctricos de vacío (áno- dos, broches y rejillas de lám- paras eléctricas)
Níquel	8,8-8,9	1.452	40-70	0,07-0,079	0,006	Cátodos de válvulas electrónicas, ánodos, rejillas

Estaño	7,3	232	2-5	0,11-0,12	0,0043-0,0044	Soldadura para estañar y soldar, hojas finas
Platino	21,4	1.773	15-35	0,09-0,1	0,0025-0,0039	Termopares, resistencias para hornos, contactos de instrumentos eléctricos
Mercurio	13,54-13,55	—38,9	—	0,958	0,009	Electrodos para los reguladores térmicos, rectificadores de vapor de mercurio
Acero	7,8	1.400-1.530	70-75	0,103-0,137	0,0057-0,006	Conductores, cables, barras colectoras, raíles
Plata	10,5	960,5	15-30	0,016-0,0162	0,0034-0,0036	Contactos de instrumentos y aparatos eléctricos
Plomo	11,34	327,4	0,95-2,0	0,217-0,222	0,0038-0,004	Envolturas protectoras de cables, fusibles, placas de acumuladores
Zinc	7,1	419,4-430	14-29	0,05-0,06	0,0039-0,0041	Recubrimiento contra la corrosión, contactos
Hierro fundido	7,2-7,6	1.200	12-32	0,5-1,4	0,0009-0,001	Resistencias de reóstatos

Nota: Los valores mayores de densidad, resistencia límite y resistencia eléctrica específica se refieren a los metales duros estirados; los valores menores de estas características, a los metales recocidos.

todo, con el cobre), constancia de la resistencia con el tiempo, alta estabilidad contra la corrosión. Las aleaciones en las que entra el cobre, (manganina y constantán) pertenecen a este grupo.

La *m a n g a n i n a* es una aleación de color marrón rojizo que consta de 86% de cobre, 12% de manganeso y 2% de níquel. Su resistencia específica es de 0,42 a 0,43 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; densidad, 8,4 kg/dm^3 ; resistencia a la ruptura, de 40 a 55 kgf/mm^2 . El coeficiente térmico de resistencia y la fuerza termoelectromotriz son muy pequeños y la temperatura máxima de trabajo no mayor de 250—300°C. La manganina es el mejor material para hacer cajas de resistencia, resistencias patrón y shunts.

El *c o n s t a n t á n* es una aleación de 60% de cobre y 40% de níquel. El constantán tiene una resistencia específica de 0,5 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; densidad, 8,9 kg/dm^3 ; resistencia a la ruptura, 40—50 kgf/mm^2 .

Se emplea para fabricar reóstatos y resistencias de electrocalentadores, si su temperatura de trabajo no supera 400—450°C.

El constantán, conjuntamente con el cobre, tiene alta fuerza termoelectromotriz y por eso no puede ser utilizado en resistencias patrón para los instrumentos de precisión, ya que la f.e.m. adicional alteraría las indicaciones de los instrumentos. Esta propiedad del constantán se utiliza en los termopares para medir las temperaturas de varios centenares de grados.

Las aleaciones para las resistencias y los reóstatos deben ser baratas, tener gran resistencia específica y pequeño coeficiente térmico. Para estos fines se emplean las aleaciones a base de cobre, por ejemplo, constantán, niquelina, etc.

Para disminuir el precio del material, el níquel, en las aleaciones para reóstatos, es sustituido por el zinc y el hierro. Las aleaciones que se usan para los calentadores eléctricos y hornos deben trabajarse bien, ser mecánicamente resistentes baratas, tener alta resistencia específica y poder funcionar durante muchas horas a altas temperaturas sin oxidarse.

Al calentar el metal, sobre su superficie se forma una película de óxido que debe proteger el metal contra la destrucción ulterior. Los metales como el cobre, hierro y cobalto tienen una película porosa de óxido. Por eso, al calentarlos se destruyen rápidamente. Los metales como el níquel, cromo y aluminio durante el calentamiento se cubren de una película densa de óxido y por eso sirven de base para preparar aleaciones resistentes al calor.

El *n i c r o m o* es una aleación de níquel y cromo. Entre los nicromos se incluye también el ferronicromo que, además de níquel y cromo, contiene hierro (58—62% de níquel; 15—17% de cromo, y el resto, hierro). La densidad del nicromo es de 8,4 kg/dm^3 ; resistencia a la ruptura, 70 kgf/mm^2 ; resistencia específica cerca de 1,0 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. El nicromo se produce en alambre y cinta que se emplean en la fabricación de resistencias en los instrumentos termo-

eléctricos y hornos, que tienen una temperatura de calentamiento de hasta 1.000°C.

La aleación **ferro-cromo-aluminio** («fecral») es una aleación con un 12 a 15% de cromo, 3 a 5% de aluminio y el resto es hierro. Tiene una densidad de 7,5 kg/dm³; la resistencia a la ruptura es de 70 kgf/mm²; y la resistencia específica cerca de 1,2 ohm·mm²/m. La temperatura de calentamiento de la aleación es de unos 800°C.

Cromoal es una aleación con 28 a 30% de cromo y 4,5-6,5 de aluminio, el resto es hierro. Su resistencia a la rotura es de 80 kgf/mm²; la resistencia específica de 1,3 a 1,4Ω·mm²/m; la temperatura permisible de trabajo, de 1.250°C.

Las características de las aleaciones de alta resistencia se dan en la tabla 8.

§ 36. Semiconductores

Los semiconductores pueden definirse como sustancias cuya conductividad eléctrica es intermedia entre la de los conductores típicos (metales, electrólitos, carbón), y la de los aisladores (porcelana, mica, goma, etc.).

Si comparamos la resistividad volumétrica de diferentes sustancias en Ω·cm, resultará que para los conductores tendremos: $\rho_V = 10^{-6} - 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$; para los semiconductores $\rho_V = 10^{-3} - 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$; para los dieléctricos $\rho_V = 10^8 - 10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$. A los semiconductores pertenecen los óxidos de metales (Al₂O₃, Cu₂O, ZnO, TiO₂, VO₂, WO₂, MoO₃); sulfuros (Cu₂S, Ag₂S, ZnS, CdS, HgS); seleniuros y telururos (compuestos binarios de selenio y telurio, respectivamente); algunas aleaciones (MgSb₂, ZnSb, Mg₂Sn, CdSb, AlSb, InSb); elementos químicos: germanio, silicio, telurio, selenio, boro, carbono, azufre, fósforo, arsénico; así como gran número de composiciones complejas (galena, carborundo y otros).

Un análisis completo y amplio de las propiedades de los semiconductores fue llevado a cabo por los científicos soviéticos A. G. Stolétov, A. F. Ioffe y sus colaboradores.

Las propiedades eléctricas de los semiconductores difieren radicalmente de las propiedades de los conductores y aisladores. La conductividad eléctrica de los semiconductores depende en alto grado de la temperatura, iluminación, presencia e intensidad del campo eléctrico y cantidad de impurezas. En los conductores, a la temperatura ordinaria, hay cierta cantidad de electrones libres obtenidos como resultado de la ruptura de enlaces electrónicos. Los semiconductores tienen dos clases de conductividad, por electrones y por huecos. La conductividad por electrones se realiza mediante los electrones libres y la conductividad por huecos, mediante el cambio de enlaces de electrones.

Examinemos el experimento siguiente. Calentemos un extremo de un conductor; el extremo calentado tendrá la carga positiva

y el extremo frío, la carga negativa. Esto se explica por el movimiento de los electrones del extremo caliente al frío, dando por resultado que en el extremo caliente del conductor haya una escasez de electrones (carga positiva), mientras que en el extremo frío un exceso de éstos (carga negativa). La circulación de una corriente eléctrica de corta duración por el conductor es causada por el movimiento de los electrones de un extremo del conductor al otro. En este caso se trata de un conductor de conductividad por electrones. Sin embargo,

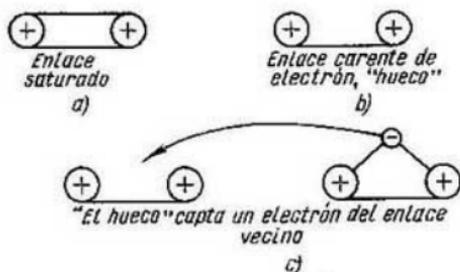


Fig. 47. Enlace entre los átomos de una substancia

existen substancias que durante el experimento análogo se comportan de otro modo: el extremo caliente de esta substancia recibe la carga negativa, mientras que el extremo frío recibe la carga positiva. Esto es posible, si suponemos que las cargas positivas son las que trasladan la corriente.

Veamos la otra clase de conductividad de los semiconductores, es decir, la conductividad por huecos. En los semiconductores puros, todos los electrones enlazados débilmente con los núcleos participan en los enlaces electrónicos. En la fig. 47, a se muestra esquemáticamente el enlace saturado entre dos átomos de una substancia. El elemento de la red cristalina de la substancia que ha perdido un electrón, lo que corresponde a la aparición de la carga positiva (fig. 47, b), se llama «hueco».

El enlace libre puede completarse nuevamente, si el «hueco» capta un electrón del enlace vecino (fig. 47, c). Este fenómeno provocará el paso del «hueco» a un lugar nuevo. La dirección de salida de los electrones y el lugar de formación del «hueco» en un semiconductor que se encuentra en condiciones normales, tienen un carácter caótico. Si al semiconductor puro se aplica una corriente continua, los electrones y los «huecos» empiezan a desplazarse (los primeros, en dirección contraria a las fuerzas del campo eléctrico, y los segundos, en dirección de las fuerzas del campo eléctrico). Si la cantidad de «huecos» formados es igual al número de electrones libres, como sucede en los semiconductores puros, la conductividad de los semi-

conductores es pequeña (conductividad propia). La presencia de una cantidad, inclusive pequeña, de impurezas puede cambiar el sistema de conductividad, es decir, puede convertirlo en conductividad por electrones o por huecos.

Estudiemos un ejemplo concreto. Como semiconductor tomamos el germanio (Ge). Cada átomo en un cristal de germanio está enlazado con otros cuatro átomos. Al elevar la temperatura o a consecuencia de la iluminación los enlaces pares del cristal de germanio pueden ser destruidos, formándose una cantidad igual de electrones libres y de «huecos» (fig. 48).

Añadimos al germanio, en calidad de impureza, arsénico. Esta impureza contiene gran número de electrones enlazados débilmente. Los átomos de la impureza tienen su nivel de energía, que se encuentra entre los niveles de energía de las bandas vacía y llena, más cercano a la última (fig. 49). Las impurezas semejantes entregan sus electrones a la banda vacía y se llaman *impurezas donadoras*. En el semiconductor aparecerán electrones libres, mientras que todos los enlaces estarán ocupados. El semiconductor tendrá conductividad por electrones en la banda vacía.

Si ahora en calidad de impureza añadimos indio (In) y no arsénico, sucederá lo siguiente. Esta impureza contiene pocos electrones enlazados débilmente y el nivel de energía de la impureza se encuentra entre los niveles de energía de las bandas vacía y llena, más cercano a la banda vacía (fig. 50). Las impurezas de esta clase admiten en su banda los electrones de la banda vecina llena y se llaman *impurezas aceptoras*. En el semiconductor surgirán enlaces desocupados, es decir, los «huecos», si faltan electrones libres. El semiconductor en este caso posee conductividad por «huecos» en la banda llena.

Con esto se explica el experimento, en que al calentar el semiconductor el extremo caliente recibía la carga negativa, y el frío, la carga positiva. Bajo el efecto del calor en el extremo caliente empezarán a destruirse los enlaces, surgirán «huecos» y electrones libres. Si el semiconductor contiene impurezas que enlazan los electrones libres, formando al mismo tiempo iones negativos de impurezas, los «huecos» empezarán a pasar hacia el extremo frío, cargándolo positivamente, y el extremo caliente del semiconductor se cargará en este caso negativamente.

Como conclusión del examen de los semiconductores, hacemos la deducción siguiente.

Añadiendo impurezas al semiconductor, se puede hacer que prevalezca la conductividad por electrones o por huecos.

Los semiconductores con conductividad por electrones se llaman semiconductores de tipo *n* (negativo), y con conductividad por huecos de tipo *p* (positivo).

Características principales de las

Aleación	Densidad, en g/cm ³	Temperatura de fusión, en °C	Límite de resistencia a la ruptura, en kgf/mm ²	Resistencia específica, en Ω·mm ² /m
1	2	3	4	5
Constantán	8,7-8,9	1.200-1.275	40-55 65-70	0,45-0,48 0,46-0,52
Manganina	8,14-8,4	920-960	45-55 60-70	0,42-0,48 0,43-0,5
Plata alemana	8,3-8,5	1.050	35-40 45-53 55-60	0,30-0,35 0,40-0,45
Nicromo (X15H60), aleación con 15% de cromo y 60% de níquel	8,2-8,25	1.380-1.390	55-65	1,02-1,18
Nicromo (X20H80) aleación con 20% de cromo y 80% de níquel	8,4	1.400	60-70	1,02-1,27
Nicromo (X20H80T)	8,0	1.510-1.520	65-70	1,02-1,17
Nicromo (X20H80T3)	8,0	1.520-1.530	65-75	1,18-1,36
Aleación ferro-cromo-aluminio (X13I04)	7,2-7,4	1.450-1.480	58-65	1,1-1,25

Nota: Los valores más pequeños del límite de resistencia a la ruptura y de la resistencia específica de estas características se refieren a las de aleaciones duras.

Tabla 8

aleaciones de alta resistencia

Coeficiente térmico, $1/^\circ\text{C}$	Termo-f.e.m. de la aleación conjuntamente con cobre, en $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	Temperatura máxima de calentamiento, en $^\circ\text{C}$	Empleo
6	7	8	9
$5 \cdot 10^{-6}$	39-42	450-500	Reóstatos y resistencias de instrumentos de baja precisión. Resistencias para temperaturas de 400 a 450°C . Termoelectrodos conjuntamente con cobre y hierro
$(3-6) \cdot 10^{-5}$	0,9-1,0	250-300	Resistencias patrón, cajas de resistencias, shunts y resistencias de instrumentos de alta precisión
$(28-30) \cdot 10^{-5}$	14-16	200-250	Reóstatos
$0,17 \cdot 10^{-3}$	—	1.000	Hornos industriales y de laboratorio con la temperatura de calentamiento hasta 900°C
$0,15 \cdot 10^{-3}$	—	1.050	Hornos industriales y de laboratorio con la temperatura de calentamiento hasta 1.000°C
$0,14 \cdot 10^{-3}$	—	1.200	Hornos industriales con la temperatura de calentamiento hasta 1150°C
$0,08 \cdot 10^{-3}$	—	1.200	Idem
$0,05 \cdot 10^{-3}$	—	850	Aparatos termoelectricos de uso doméstico y hornos industriales con la temperatura de calentamiento hasta de 650°C

tencia específica se refieren a las clases de aleaciones dúctiles (alambre, cintas); los

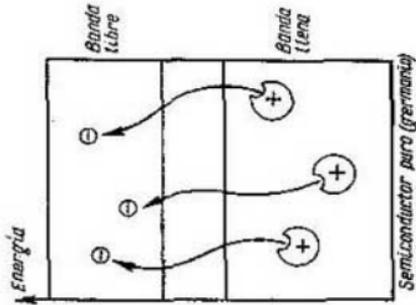
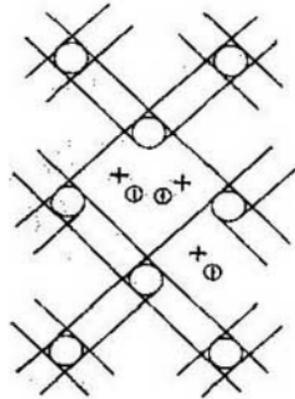


Fig. 48. Conductividad propia de un semiconductor

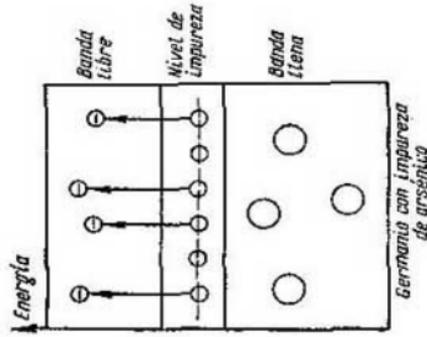
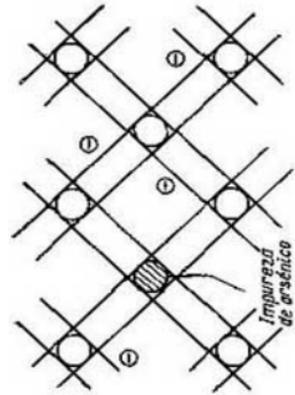


Fig. 49. Conductividad por electrones de un semiconductor

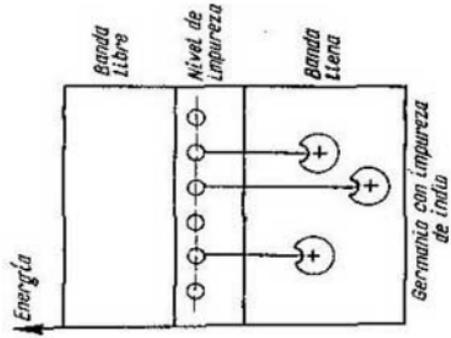
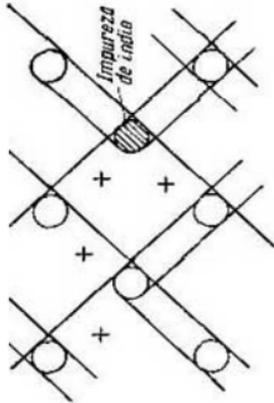


Fig. 50. Conductividad por huecos de un semiconductor

Problemas

1. Determinar la resistencia de un alambre de hierro de 100 m de longitud y 1 mm de diámetro.
2. ¿Cuál es la resistencia de un conductor de aluminio de $2,5 \text{ mm}^2$ de sección y de 300 mm de longitud?
3. Es necesario fabricar un reóstato de 20Ω de alambre de níquelina. Determinar la sección del alambre, si su longitud es igual a 5 m.
4. La resistencia de un hornillo eléctrico es de 24Ω . ¿Cuál debe ser la longitud del alambre de nicromo de esta resistencia si la sección del alambre es de $0,5 \text{ mm}^2$?
5. 200 m de alambre de 4 mm^2 de sección tienen una resistencia de $6,5 \Omega$. Determinar el material del conductor.
6. La longitud de un conductor es de 25 cm. El conductor es de volframio. Determinar la sección del conductor, si su resistencia es de $0,05 \Omega$.

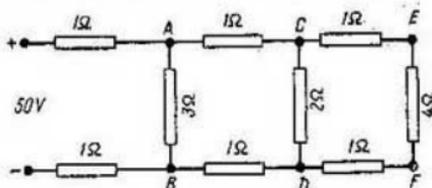


Fig. 51. Para el problema 15

7. Calcular la resistencia de un alambre telegráfico de 4 mm de diámetro, 150 km de longitud, si el alambre es de hierro.
8. La conductancia de un alambre de nicromo de 80 m de longitud es igual a 0,025 mhos. Determinar la sección del alambre.
9. Determinar la temperatura del devanado de una máquina eléctrica hecha de alambre de cobre, si antes de conectar la máquina su resistencia a 15°C era de 70Ω y durante el funcionamiento aumenta hasta $85,05 \Omega$.
10. Por la resistencia de nicromo de un hornillo eléctrico pasa una corriente de 5 A. La sección del alambre es de $0,6 \text{ mm}^2$. Determinar la longitud del alambre, si el hornillo está conectado a una red de 120 V de tensión.
11. Se da una bobina de alambre de cobre de $0,5 \text{ mm}^2$ de sección. La longitud del alambre es de 200 m. ¿Qué tensión puede crear en esta bobina una corriente de 4 A?
12. Para que una linterna de arco arda en forma constante hay que tener 60 V y 10 A. Para alimentar la linterna hay instalado un alternador de 120 V de tensión. Determinar la magnitud de la resistencia adicional a la linterna de arco, si la resistencia de los conductores de unión es de $0,2 \Omega$.
13. Un voltímetro está calculado para 20 V. Por su devanado pasa una corriente de 0,05 A. Para conectar el voltímetro a la red de 100 V hubo que intercalar una resistencia adicional. Determinar su magnitud.
14. A la tensión de 60 V en un circuito pasa la corriente de 2,5 A. ¿Qué resistencia adicional es necesario conectar para que en el circuito pase una corriente de 2 A?
15. Un generador de corriente da una tensión de 50 V. En el circuito hay conectada una resistencia de $0,3 \Omega$. Cada uno de los conductores tiene la resistencia de 1Ω . En paralelo con la primera resistencia (a sus extremos) está conectada la segunda resistencia de 2Ω a través de conductores de unión de 1Ω cada uno. En paralelo con la segunda (a sus extremos) está conectada la tercera resistencia de 4Ω a través de conductores de unión también de 1Ω cada uno (fig. 51). Determinar las indicaciones de los voltímetros conectados a los terminales de cada resistencia (en los puntos A — B, C — D, E — F).

16. Un circuito eléctrico consta de conductores de $0,4\Omega$ de resistencia, una lámpara eléctrica de 150Ω de resistencia y un reóstato para 120Ω . ¿Cuál es la resistencia de todo el circuito, si los conductores, la lámpara y el reóstato están conectados en serie.

17. Cuatro conductores con resistencias de 3, 4, 6 y 2Ω están conectados en paralelo. Determinar la resistencia total de los conductores.

18. Determinar la resistencia de un conductor de cobre de 800 m de longitud, que consta de siete hilos de $1,7\text{ mm}$ de diámetro cada uno.

19. Un alambre de hierro de 20 m de longitud y $1,5\text{ mm}^2$ de sección, un alambre de aluminio de 50 m de longitud y 2 mm^2 de sección, un alambre de nicromo de 10 m de longitud y $0,5\text{ mm}^2$ de sección están conectados en serie a la red. Determinar la resistencia total de todos los alambres.

20. La primera derivación de una conexión en paralelo consta de una resistencia de 18Ω . La segunda consta de tres resistencias conectadas en serie de 12Ω cada una. Determinar la resistencia total de la conexión.

21. Ocho conductores de 10Ω de resistencia cada uno están conectados en cuatro grupos paralelos iguales. Determinar la resistencia total del circuito.

22. Un conductor de 7Ω de resistencia está conectado en serie con una derivación que consta de cuatro conductores de 2, 4, 6 y 8Ω . Determinar la resistencia total del circuito.

23. Una derivación de tres resistencias conectadas en paralelo de 3, 8 y 6Ω está unida en serie con otra derivación compuesta de cuatro resistencias de 2, 7, 6 y 3Ω . Determinar la resistencia total del circuito.

24. Tres conductores están conectados entre sí en paralelo. La resistencia del primer conductor es de 3Ω , del segundo, 4Ω , del tercero, 6Ω . La corriente que pasa por el primer conductor es igual a 2 A. Determinar la corriente total.

25. La tensión de la red es de 12 V. La corriente total que consumen cuatro lámparas iguales conectadas en paralelo es igual a 8 A. Determinar la resistencia de cada lámpara.

26. Un grupo de tres conductores unidos en paralelo de 2, 9 y 6Ω está conectado en serie con otro grupo de cuatro conductores unidos en paralelo de 2, 4, 6 y 3Ω . La tensión de la red es de 30 V. Determinar la corriente en cada conductor.

27. La tensión de un generador es de 110 V. A la red están conectadas en paralelo 40 lámparas de 200Ω cada una. Determinar la f. e. m. del generador, si su resistencia interna es de $0,2\Omega$.

28. Se da un circuito compuesto de cuatro resistencias conectadas en paralelo de 6, 4, 3 y 8Ω . La corriente que pasa por el punto de derivación es de 20 A. Determinar la corriente que pasa por cada derivación.

29. Un motor eléctrico para 120 V consume corriente de 25 A, y está instalado a la distancia de 200 m de la fuente de energía eléctrica. Determinar la sección de los conductores de cobre que van al motor, si la tensión de la fuente de energía es de 125 V.

30. La longitud de una línea de transmisión eléctrica es de 300 m. La línea está hecha con conductor de cobre de 150 mm^2 de sección. La fábrica consume una corriente de 200 A. ¿Qué tensión recibirá la fábrica si la tensión en los terminales de la central eléctrica es de 240 V?

31. ¿Qué cantidad de energía eléctrica gasta un horno eléctrico durante 30 min, si consume una corriente de 10 A a la tensión de 120 V?

32. En el zócalo de una lámpara de incandescencia está anotado: 200 W, 220 V. Determinar la resistencia del filamento de la lámpara.

33. La potencia de un motor eléctrico es de 3 kW. ¿Cuál es la corriente en su devanado, si la tensión de la red es igual a 120 V?

34. Un motor eléctrico conectado a la red de 220 V consume una corriente de 8 A. ¿Qué trabajo realiza la corriente durante 2 h 30 min y cuál es la potencia del motor?

35. En un apartamento hay seis lámparas. Dos son de 40 W de potencia cada una y están encendidas 5 h al día; dos de 60 W cada una, 6 h; y dos de

15 W cada una, 4 h. ¿Cuánto hace falta pagar, si todas las lámparas trabajan durante un mes (30 días) siendo la tarifa de 4 kopeks por 1 kWh.

36. Un motor eléctrico de 5 kW de potencia y 110 V de tensión está instalado en una sierra. El motor recibe la energía de un generador dispuesto a 150 m del motor. La tensión del generador se mantiene igual a 120 V. Determinar: a) la sección de los conductores de cobre que van desde el generador al motor, b) la potencia del generador, c) la pérdida de la potencia en los conductores.

37. En una central eléctrica está instalado un generador de 240 V. La energía se suministra al consumidor a una distancia de 200 m. El consumidor toma de la red una corriente de 60 A. La pérdida de la potencia en los conductores es igual al 10% de la que se transmite. Determinar la sección de los conductores de cobre de la línea.

38. Al generador que entrega para galvanostegia una corriente de 900 A y 6 V de tensión, está unido un motor de gasolina. Determinar la potencia de este motor en CV, si el rendimiento de la transmisión es de 95%.

39. Un generador de una tensión de 115 V y dispone de una potencia de 10 kW. La energía se transmite por conductores de aluminio de 95 mm² de sección a una distancia de 250 m. Determinar la potencia que recibe el consumidor.

Preguntas de control

1. ¿Qué es la resistencia eléctrica?
2. ¿De cuáles factores depende la resistencia eléctrica?
3. ¿En qué unidades se mide la resistencia eléctrica?
4. ¿Qué es la resistividad?
5. ¿Cómo determinar la resistencia de un conductor, si se sabe su longitud, material de que está hecho y sección?
6. ¿Qué es la conductividad eléctrica?
7. ¿Cómo se calcula la caída de tensión en los conductores, si se sabe la resistencia de éstos y la corriente de carga?
8. ¿Qué expresa la ley de Ohm para un sector del circuito y cuál es su fórmula?
9. ¿Qué expresa la ley de Ohm para todo el circuito y cuál es su fórmula?
10. ¿Qué es un cortocircuito, cuáles son sus consecuencias y cómo evitarlo?
11. ¿Cómo se efectúa la conexión en serie de los conductores?
12. ¿Cómo se efectúa la conexión en paralelo de los conductores?
13. ¿Cómo se lee la primera ley de Kirchhoff?
14. ¿Cómo se efectúa la conexión mixta de los conductores?
15. ¿Cómo se lee la segunda ley de Kirchhoff?
16. ¿Por cuáles efectos se puede juzgar sobre el trabajo de la corriente eléctrica?
17. ¿En qué unidades se mide el trabajo de la corriente eléctrica?
18. ¿Qué es la potencia eléctrica, cómo y en qué unidades se mide?
19. ¿Cómo determinar la potencia, si no se dispone de un vatímetro?

III

EFFECTOS QUIMICOS DE LA CORRIENTE ELECTRICA Y LAS FUENTES QUIMICAS DE CORRIENTE

§ 37. Electrólisis

Como se ha dicho antes, entre los conductores de la corriente eléctrica, conjuntamente con los metales, sus aleaciones y el carbón, se incluyen también las soluciones de ácidos, hidróxidos y sales. Al pasar la corriente eléctrica por los conductores metálicos, estos últimos no experimentan ningún cambio en su estructura. La corriente eléctrica surge en éstos a cuenta del movimiento de los electrones libres que circulan por el conductor.

Al circular una corriente eléctrica por un conductor líquido, se produce la descomposición química de éste. Por eso los conductores líquidos se llaman conductores de segunda clase o electrólitos, a diferencia de los conductores metálicos, que se llaman conductores de primera clase. La descomposición de los electrólitos bajo la acción de la corriente eléctrica se denomina *electrólisis*.

La electrólisis se realiza en celdas electrolíticas, es decir, en unos recipientes con electrólito, descomponiéndose este último por la acción de la corriente.

En la celda con electrólito se sumergen dos placas (por ejemplo, de carbón) representando los electrodos. Conectemos el polo negativo de una fuente de corriente continua a un electrodo (al cátodo), y el polo positivo, al otro electrodo (al ánodo) y cerremos el circuito. El fenómeno de electrólisis va acompañado de desprendimiento de substancia en los electrodos. Como muestran los experimentos, durante la electrólisis, el hidrógeno y los metales se depositan sobre el cátodo. De aquí se deduce que la circulación de la corriente eléctrica por los conductores líquidos está vinculada con el movimiento de los átomos de las substancias.

¿Qué es la corriente eléctrica en los electrólitos?

Según la teoría moderna, la molécula neutra de una substancia al penetrar en un disolvente se descompone (se disocia) en partículas que reciben el nombre de iones, portadoras de cargas eléctricas iguales y de signo contrario. Esto se explica por el hecho de que la fuerza de acción recíproca entre las cargas, que se encuentran en un medio con constante dieléctrica ϵ , disminuye ϵ veces (véase

la fórmula de Coulomb). Por eso, las fuerzas que unen la molécula de la substancia, que se halla en un disolvente con gran constante dieléctrica (por ejemplo, el agua con $\epsilon = 81$), disminuyen y resultan suficientes repetidos choques térmicos entre las moléculas para que éstas empiecen a dividirse en iones, es decir, a disociarse.

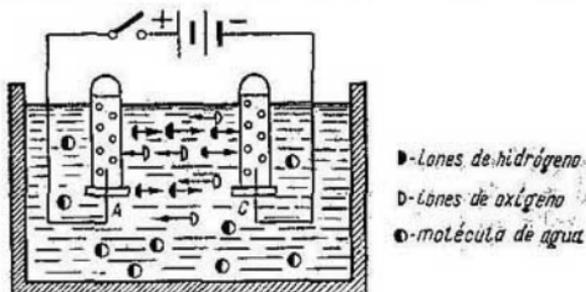
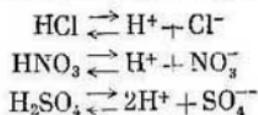


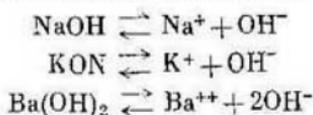
Fig. 52. Electrólisis del agua

Paralelamente a la disociación de las moléculas, tiene lugar en la solución un proceso inverso: la asociación de los iones en moléculas neutras.

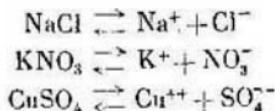
Los ácidos se disocian en iones de hidrógeno con cargas positivas y en iones de radical ácido, con cargas negativas:



Los hidróxidos se disocian en iones de metal y en iones hidroxilo.



Las sales se disocian en iones de metal y en iones de radical ácido.



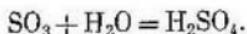
Si se aplica a los electrodos una tensión permanente, entre ellos se forma un campo eléctrico. Los iones con cargas positivas comenzarán a moverse en dirección al cátodo y los iones con cargas negativas hacia el ánodo. Llegando a los electrodos, los iones se neutralizan. Como ejemplo veamos la electrólisis del agua (fig. 52).

Electrólisis del agua. En calidad de electrólito se toma el agua. Para que la conductividad sea mejor, se añade al agua una pequeña cantidad de ácido, hidróxido o sal. Al hacer pasar la corriente eléctrica a través de la celda, aparecen burbujas de gas en ambos electrodos *A* y *C*. Si sobre los electrodos colocamos, en posición invertida, probetas con agua, las burbujas de gas ascenderán, desplazando el líquido. La probeta que cubre el cátodo *C* se llena con gas dos veces más pronto que la otra. Si sacamos la primera probeta (sin voltearla) y le acercamos un fósforo encendido, el gas que se encuentra en ella arderá con llama azul y se oír un sonido a modo de chasquido. Este gas es hidrógeno.

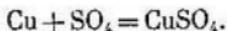
Si sacamos la probeta que cubre el ánodo y le acercamos una brasa, ésta se inflamará con una llama viva. Esto nos demuestra que en la probeta hay oxígeno.

Con este experimento fue demostrado que el agua es un compuesto químico de oxígeno e hidrógeno.

Electrólisis del sulfato de cobre. Llenemos un recipiente con solución de sulfato de cobre y coloquemos como electrodos dos placas de carbón. Las moléculas del sulfato de cobre se disocian en iones SO_4^- y Cu^{++} . Conectemos una fuente de corriente continua. Los iones empezarán a pasar hacia los electrodos correspondientes. El ion Cu^{++} llegando al cátodo recibe de éste electrones y, en forma de molécula neutra de cobre, se deposita sobre la placa de carbón. El ion SO_4^- acercándose al ánodo le entrega el exceso de electrones, y se convierte en SO_4 neutro e inestable que se disocia en SO_3 y O . El oxígeno se desprende en el ánodo, y el SO_3 , combinándose con el agua, forma una molécula de ácido sulfúrico:



La cantidad de cobre que va depositándose sobre el cátodo, aumentará con el tiempo, a su vez, la cantidad de cobre en la solución seguirá disminuyendo. Si cambiamos el ánodo de carbón por una placa de cobre, el SO_4 que se desprende en el ánodo, entrando en reacción química con la sustancia de la placa de lugar a una reacción secundaria:



En este caso la concentración de la solución no varía, pero el depósito de cobre en el cátodo va acompañado de la disolución de la placa anódica de cobre.

De lo dicho anteriormente se deduce que la corriente eléctrica en los electrólitos consiste en un movimiento de las partículas cargadas de las sustancias, es decir, de los iones. De este modo, si los conductores metálicos poseen una conductividad por electrones, los electrólitos tienen una conductividad por iones.

En los conductores de segunda clase, así como en los conductores de primera, existe una dependencia entre la tensión (diferencia de potencial) y la intensidad de la corriente eléctrica, expresada por la ley de Ohm.

§ 38. Primera ley de Faraday

El fenómeno de la electrólisis, tanto cuantitativa, como cualitativamente fue estudiado por Faraday.

La primera ley de Faraday establece que: la masa de una substancia depositada en un electrodo durante la electrólisis es proporcional a la intensidad de la corriente y al tiempo que ésta ha circulado, es decir, a la cantidad de electricidad que ha pasado por el electrólito.

La corriente eléctrica de la misma intensidad, pasando por diferentes electrólitos durante el mismo tiempo, deposita sobre los electrodos diferentes cantidades de substancias. La cantidad de la substancia, en miligramos, que se deposita sobre el electrodo por una corriente de 1 A durante 1 seg se llama equivalente electroquímico y se designa con la letra α .

El equivalente electroquímico se puede determinar experimentalmente.

Tomemos una celda galvánica con solución de sulfato de cobre. El peso exacto de la placa catódica, antes de hacer el experimento, es de 50 g. Conectemos una fuente de la corriente eléctrica y establezcamos en el circuito la intensidad $I = 3$ A. Pasados 30 min desconectemos la fuente de corriente eléctrica y posemos otra vez la placa catódica. A cuenta del cobre que se depositó, el peso de la placa ha aumentado hasta 51,7766 g.

Por lo tanto, con la corriente de 3 A, durante 30 min (1800 seg) se ha depositado $51,7766 - 50 = 1,7766$ g ó 1776,6 mg de cobre. Una corriente eléctrica de 1 A depositará en 1 seg:

$$\frac{1.776,6}{1.800 \cdot 3} = 0,329 \text{ mg de cobre.}$$

De este modo, experimentalmente hemos encontrado el equivalente electroquímico del cobre. Realizando experimentos semejantes con diferentes electrólitos, podemos encontrar los equivalentes electroquímicos para otras substancias.

A continuación se dan los valores de los equivalentes electroquímicos de algunos elementos:

Aluminio	0,0936	Plata	1,118
Hierro	0,289	Mercurio	2,072
Oro	0,681	Níquel	0,304
Cobre	0,329	Hidrógeno	0,0104
Plomo	1,072	SO ₄	0,4975
Zinc	0,3387		

La primera ley de Faraday se expresa con la fórmula.

$$M = \alpha It, \text{ o bien, } M = \alpha Q,$$

donde M es la cantidad de substancia depositada, en mg,

α = equivalente electroquímico;

I = intensidad de la corriente, en amperios;

t = tiempo, en segundos;

Q = cantidad de electricidad, en culombios.

Ejemplo 1. Determinar la cantidad de níquel metálico que se depositará sobre el cátodo de la solución de sulfato de níquel con una corriente de 5 A durante 20 min.

$$I = 5 \text{ A};$$

$$t = 20 \text{ min} = 1.200 \text{ seg};$$

$$\alpha = 0,304;$$

$$M = ?$$

$$M = \alpha It = 0,304 \cdot 5 \cdot 1.200 = 1.824 \text{ mg}.$$

Debe hacerse notar que la cantidad de substancia que se desprende durante la electrólisis no depende de la forma de la celda electrolítica, ni de la concentración de la solución, ni de la temperatura, etc.

§ 39. Segunda ley de Faraday

Por la química se sabe que el equivalente químico (m) de un elemento es la relación de su peso atómico (A) con su valencia (n):

$$m = \frac{A}{n}.$$

Si calculamos la relación del equivalente electroquímico de un elemento con su equivalente químico, obtendremos el mismo número para todos los elementos: 0,01036 (tabla 9).

La segunda ley de Faraday establece la proporcionalidad entre los equivalentes químico y electroquímico.

Tabla 9

Relación entre los equivalentes electroquímico y químico de algunos elementos

Elemento	Equivalente electroquímico, α	Peso atómico, A	Valencia, n	Equivalente químico, m	Relación α/m
Hidrógeno	0,0104	1,008	1	1,008	0,01036
Plata	1,148	107,88	1	107,88	0,01036
Níquel	0,304	58,68	2	29,34	0,01036
Aluminio	0,0936	27,4	3	9,03	0,01036
SO ₄	0,4975	96,07	2	48,03	0,01036

Utilizando la segunda ley de Faraday, se puede calcular el equivalente electroquímico de un elemento.

Ejemplo 2. Calcular el equivalente electroquímico del zinc, si su peso atómico es 65,37 y la valencia es 2.

$$A = 65,37$$

$$n = 2;$$

$$\alpha = ?$$

El equivalente químico:

$$m = \frac{A}{n} = \frac{65,37}{2} = 32,68;$$

$$\alpha = 0,01036 \cdot 32,68 = 0,3387.$$

La segunda ley de Faraday indica de qué propiedades del elemento depende la magnitud de su equivalente electroquímico:

$$\alpha = 0,01036 \frac{A}{n}.$$

Por la química sabemos que equivalente-gramo de un elemento es la cantidad de gramos numéricamente igual al equivalente químico de este elemento. Por ejemplo, el equivalente químico de la plata es igual a 107,88. El equivalente-gramo de la plata es 107,88 g.

Si 1 culombio de electricidad que pasa a través de una solución de nitrato de plata deposita 1,118 mg de plata, para depositar 107,88 g en lugar de 1,118 mg es necesario que pase una corriente eléctrica no de 1 culombio, sino de $107,88 \times 1.000 : 1,118 = 96.500$ culombios. La misma cantidad de electricidad se necesitará para depositar 1,008 g de hidrógeno, 29,34 g de níquel, 9,03 g de aluminio, etc. Por lo tanto, para depositar un equivalente-gramo de cualquier elemento por medio de la electrólisis, es necesario pasar 96.500 culombios. Este número se llama número de Faraday. Mediante diversos experimentos se ha determinado que en un equivalente-gramo de cualquier elemento monovalente hay $6,06 \times 10^{23}$ átomos. De este modo, 1,008 g de hidrógeno y 107,88 g de plata contienen el mismo número de átomos. En un equivalente-gramo de un elemento divalente hay dos veces menos átomos y, en los trivalentes, tres veces menos átomos que en un elemento monovalente.

Si son necesarios 96.500 culombios para depositar un equivalente-gramo de substancia y cada equivalente-gramo contiene $6,06 \cdot 10^{23}$ átomos, cada átomo de substancia contiene una carga de:

$$e = \frac{96,500}{6,06 \times 10^{23}} = 16 \times 10^{-20} C.$$

La molécula neutra de sal común NaCl, hallándose en solución, se disociará en ion positivo de sodio (Na) con carga $+e = 16 \times 10^{-20}$ culombios y un ion negativo de cloro (Cl) con carga $-e = 16 \times 10^{-20}$ culombios. La molécula de cloruro de zinc $ZnCl_2$ se disociará en el

grupo cargado negativamente de dos átomos de cloro con carga $-2e = 2 \times 16 \times 10^{-20}$ culombios y un ion de zinc cargado positivamente con carga $+2e = 2 \times 16 \times 10^{-20}$ culombios.

El ion de hidrógeno que ha perdido un electrón tendrá una carga positiva $+e = 16 \times 10^{-20}$ culombios. Por eso, la cantidad 16×10^{-20} culombios es una carga eléctrica elemental, es decir, la magnitud de carga de un electrón o protón.

Cada elemento con valencia n convirtiéndose en ion pierde o adquiere n electrones. De este modo, el fenómeno de la electrólisis confirma la justeza de la teoría electrónica.

§ 40. Aplicación técnica de la electrólisis

La electrólisis se emplea ampliamente en la técnica; por ejemplo:

1. El recubrimiento de los metales con una capa fina de otro metal mediante la electrólisis (galvanostegia).

Para preservar los metales de la oxidación, así como para darles solidez y mejor aspecto exterior, se recubren con una capa fina de metales preciosos (oro, plata) o de metales que se oxidan poco (cromo, níquel).

El objeto que se ha de galvanizar se limpia cuidadosamente, se pule y se desgrasa; después se sumerge en el baño electrolítico

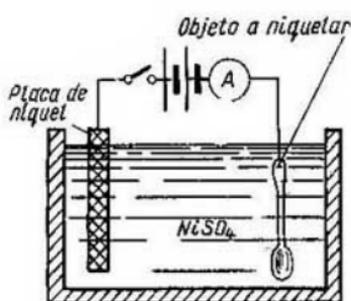


Fig. 53. Galvanostegia

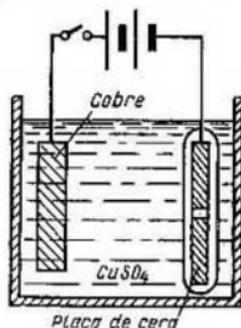


Fig. 54. Galvanoplastia

en calidad de cátodo. La solución de la sal del metal, con el cual se realiza el recubrimiento galvánico, es el electrolito. El ánodo es una placa de este metal. En la fig. 53 se muestra una celda electroquímica para niquelar. El electrolito es la solución acuosa de una sustancia que contiene níquel (por ejemplo, sulfato de níquel (NiSO_4)), el cátodo es el objeto a niquelar. La corriente eléctrica que pasa por el baño electrolítico debe corresponder a las dimensiones de la superficie del objeto que se niquela. Generalmente, para el niquelado se emplea una densidad de corriente eléctrica igual a $0,4 \text{ A/dm}^2$. Para

recubrir uniformemente el objeto se coloca entre dos placas anódicas. Después de recubrir el objeto se saca del baño, se seca y pule.

2. Obtención de reproducciones de objetos por medio de la electrólisis (galvanoplastia).

Para obtener la reproducción de objetos metálicos (monedas, medallas, bajorrelieves, etc.) se hace una copia de cualquier material plástico (por ejemplo, de cera). Para que la copia tenga conductividad, se cubre con polvo de grafito, se sumerge en el baño electrolítico en calidad de cátodo obteniéndose sobre él una capa de metal de espesor necesario. Después, se calienta para quitarle la cera.

La producción de los discos gramofónicos (fig. 54) está basada en el empleo de la galvanoplastia. Una placa de cera grabada, cubierta con polvo de oro para tener conductividad, se sumerge como cátodo en una solución de sulfato de cobre. El ánodo de cobre mantiene constante la concentración de la solución. El negativo metálico de relieve obtenido sirve para estampar gran número de discos gramofónicos a partir de goma laca.

La galvanoplastia se emplea en muchas ramas de la industria, incluso en las artes gráficas. El proceso de galvanoplastia fue elaborado en 1836 por el académico ruso Boris Jacobi (1801—1874). Jacobi es conocido por sus numerosos trabajos en el campo de la electrotecnia. Es inventor del primer electromotor con rotación directa del árbol, del colector para rectificar la corriente, de los aparatos teleimpresores electromagnéticos y de aguja, así como del impresor de letras. Descubrió la aparición de la fuerza contraelectromotriz durante la rotación del inducido del motor, y por primera vez (1838) propulsó un bote aplicando la energía eléctrica.

Jacobi creó instrumentos para medir la resistencia eléctrica, hizo el patrón de resistencia y construyó el voltímetro.

3. Afinación (purificación) de metales

El cobre ha obtenido a consecuencia de su buena conductividad, la mayor aplicación como conductor en electrotecnia. La mena de cobre, además de este metal, contiene muchas impurezas, como, por ejemplo: hierro, azufre, antimonio, arsénico, bismuto, plomo, fósforo, etc. El proceso de la obtención del cobre de la mena consiste en lo siguiente. El mineral se tritura y se calcina en hornos especiales, donde se queman algunas impurezas y el cobre se convierte en óxido de cobre. Este se funde nuevamente en hornos en combinación con carbón, efectuándose la reducción y obteniéndose un producto que se llama cobre bruto (o negro) con un contenido de 98 a 99% de cobre. El cobre que se utiliza en la electrotecnia debe tener la máxima pureza, ya que cualquiera de las impurezas disminuye la conductividad del mismo. Tal cobre se obtiene del cobre bruto mediante su afinación por el método electrolítico.

El cobre impuro se sumerge en calidad de ánodo en el baño electrolítico con solución del sulfato de cobre (fig. 55), y como cátodo se emplea una chapa de cobre puro. Al hacer pasar la corriente eléctrica a través del baño electrolítico, el cobre del ánodo pasa

a la solución y de ésta se deposita sobre el cátodo. El cobre electro-lítico contiene hasta 99,95% de cobre. En la electrotecnia el cobre se emplea para fabricar conductores desnudos y aislados, cables de alta y baja tensión, devanados de máquinas eléctricas y transformadores, barras de cobre, cintas, varillas, delgas de los colectores, piezas de máquinas y aparatos.

El aluminio sigue al cobre en importancia como conductor. La materia prima principal para obtener el aluminio es la bauxita, que consta de óxido de aluminio (hasta el 70%), de óxido de silicio y de óxido de hierro. Como resultado del tratamiento de las bauxitas con hidróxido de sodio se obtiene la alúmina (Al_2O_3).

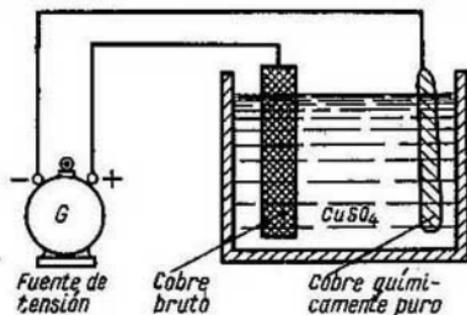


Fig. 55. Afinación del cobre

La alúmina, con adición de otros minerales (para reducir la temperatura de fusión), se carga en una celda electrolítica, cuyas paredes y el fondo están revestidas con placas de carbón conectadas con el polo negativo de la fuente de corriente. A través de la tapa de la celda pasa una varilla de carbón, que sirve de ánodo. Primeramente se baja el ánodo de carbón, debido a lo cual surge el arco eléctrico que funde la alúmina. Ulteriormente tiene lugar la electrólisis de la masa fundida. El aluminio puro se deposita en el fondo de la celda, de donde se vierte a moldes. El contenido del aluminio en el metal alcanza el 99,5%. Para obtener el aluminio se requiere una gran cantidad de energía eléctrica. Por eso, las fábricas de aluminio se construyen cerca de las grandes plantas hidroeléctricas.

El aluminio se emplea en la electrotecnia para fabricar conductores, cables, así como para obtener aleaciones.

§ 41. Pilas eléctricas

Las pilas eléctricas son fuentes de corriente eléctrica continua y se llaman elementos primarios. La energía eléctrica obtenida en este caso se genera debido a reacciones químicas que tienen lugar en el interior de la pila. Examinemos el principio de funcionamiento

del elemento electroquímico más sencillo. La pila galvánica (fig. 56) consta de una vasija con una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en la que están sumergidas dos placas: una de zinc, y la otra, de cobre. El zinc en este caso se carga negativamente y el cobre, positivamente. La pila tiene dos terminales, es decir, dos polos: el polo positivo (ánodo) y el polo negativo (cátodo).

La placa de zinc, sumergida en la solución de ácido sulfúrico, se disuelve. La capacidad del zinc de entregar con facilidad sus electrones conduce a que el átomo de zinc entregue sus dos electrones a la placa (el metal es divalente) y pase a la solución en forma de ion

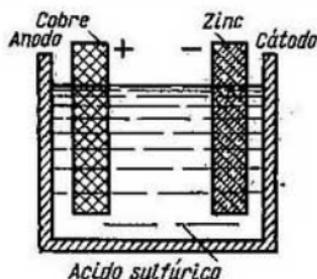


Fig. 56. Pila galvánica

positivo. Entre la placa de zinc y la solución se establece un equilibrio que detiene la disolución ulterior de la placa de zinc. Si se sumerge otra placa de zinc en la solución de ácido sulfúrico, con ésta sucede lo mismo que con la primera placa. El potencial de ambas placas será idéntico y la diferencia de potencial entre ellas será igual a cero. Sumerjamos en la solución una placa de cobre. Teniendo menor capacidad de disolución, el cobre tendrá otra diferencia de potencial respecto a la solución que el zinc. En este caso entre las placas de cobre y la de zinc se forma una diferencia de potencial.

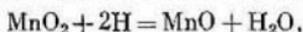
La diferencia de potencial (f.e.m.) entre las placas (electrodos) es igual a 1,1 V.

Al cerrar los polos del elemento con un conductor metálico, los electrones de la placa de zinc pasarán a la placa de cobre. Debido a la pérdida de los electrones, el potencial entre la placa de zinc y la solución disminuye y una nueva porción de iones pasará de la placa a la solución, enriqueciéndose de nuevo la placa con electrones. Hallándose en la solución, los iones positivos de zinc se unen con los iones negativos del ácido sulfúrico SO_4^{--} y forman una molécula de sulfato de zinc $ZnSO_4$.

El ion positivo de hidrógeno H^+ al acercarse a la placa de cobre, toma de ella los electrones libres, y neutralizándose, se desprende en forma de burbujas sobre la placa de cobre. Como resultado del trabajo de la pila, la placa de zinc, disolviéndose en el ácido, va

adquiriendo electrones y la placa de cobre, entregando los electrones, conserva la carga positiva y se cubre de burbujas de hidrógeno. En el circuito exterior tiene lugar el movimiento de electrones desde la placa de zinc hacia la de cobre, en el interior del electrólito, los iones negativos pasan del cobre al zinc y los iones positivos, del zinc al cobre. Las indicaciones del amperímetro conectado en el circuito de la pila disminuyen rápidamente. Esto se explica del modo siguiente. La placa de cobre junto con el hidrógeno que cubre esta placa, forma un par galvánico que es de por sí una especie de pila, cuya f.e.m. está dirigida contra la f.e.m. de la pila. Este fenómeno se llama polarización. Debido a su gran polarización, la pila de cobre-zinc no se emplea en la práctica.

Entre las pilas que no se polarizan está la de Leclanché. En ésta los electrodos son dos placas, una de carbón y la otra de zinc, y el electrólito es una solución de cloruro de amonio NH_4Cl . Una barra de carbón está colocada en una bolsita con dióxido de manganeso MnO_2 , que elimina la polarización (*despolarizador o despolarizante*). La f.e.m. de la pila es de 1,45 V. Durante el funcionamiento de la pila de Leclanché, el hidrógeno, que se desprende de la solución entra en reacción con el dióxido de manganeso:



como resultado, se forma agua y no tiene lugar la polarización.

Frecuentemente las pilas de Leclanché se producen en forma de pilas secas.

En la fig. 57 se muestra una pila seca con despolarizador de manganeso. Está colocada en un envase de zinc 1, que al mismo tiempo sirve de polo negativo de la pila. La parte superior del envase está revestida con cartón. En medio del recipiente hay una barra de carbón 2, que sirve como polo positivo de la pila. Alrededor de la barra de carbón se encuentra el despolarizador 3, que consta de granos molidos de dióxido de manganeso, grafito y hollín, en solución de cloruro amónico. El despolarizador se coloca en una bolsa de tejido de algodón. Para aislar el despolarizador del zinc, en el fondo del envase de zinc hay puesta una junta de cartón 4.

La bolsa con despolarizador está rodeada con pasta 5, compuesta de harina empapada en solución de cloruro amónico. Para evitar que la pasta se pudra o se seque, se le mezcla cloruro de zinc. La parte superior de la bolsa, con el despolarizador, se cubre con una tapa de cartón 6 sobre la cual se echa una capa de aserrín 7, revestida también con una tapa de cartón.

Del envase de zinc y de la varilla de carbón salen dos terminales. Para que salgan los gases que se forman durante el funcionamiento de la pila, en la parte superior de ésta se coloca el tubo de vidrio 8. La parte superior de la pila seca se cubre con pez 9.

Las pilas secas con despolarizador de manganeso tienen f.e.m. de 1,4 a 1,6 V y resistencia interior de 0,1 a 0,5 ohms.

La cantidad de electricidad en amperios-hora que puede generar la pila seca en condiciones determinadas de descarga se llama capacidad de la pila. Los ensayos hechos con los elementos primarios muestran que su capacidad depende:

1) de la magnitud de la corriente eléctrica de descarga: cuanto mayor es la corriente de descarga, tanto menor capacidad se puede obtener de la pila;

2) del servicio de la pila (ininterrumpido, con intervalos);

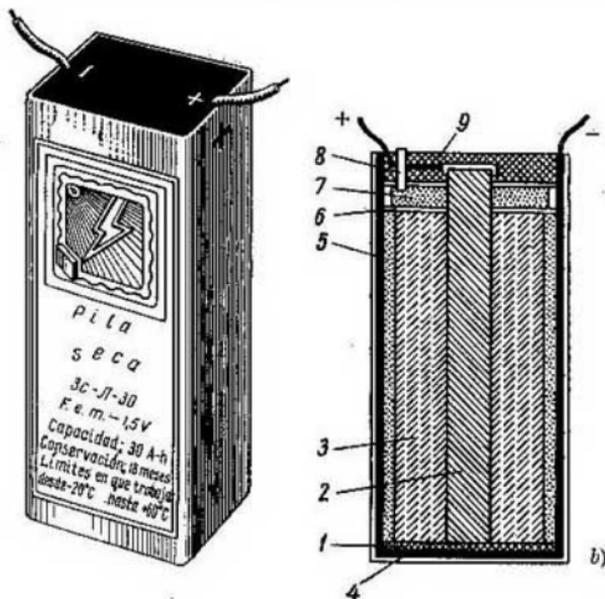


Fig. 57. Pila de carbón y zinc con despolarizador:
a — aspecto exterior de la pila seca, b — corte de la pila seca

3) de la temperatura: cuanto menor es la temperatura, tanto menor es la capacidad del elemento;

4) de la magnitud de la tensión hasta la cual se efectúa la descarga.

Las designaciones de las pilas secas con despolarizante de manganeso son: *C* — la pila seca; *J* — de verano (trabajo de -20°C hasta $+60^{\circ}\text{C}$); *X* — resistente al frío (trabajo de -40° hasta $+40^{\circ}\text{C}$); *Y* — universal (trabajo de -40° hasta $+60^{\circ}\text{C}$).

Las primeras cifras 1—4 indican la dimensión de la pila seca; las siglas indican su característica; las últimas cifras indican la capacidad en amperios-hora.

Por ejemplo, 3CJ-30 significa: pila de tercera dimensión, seca, de verano, con capacidad de 30 A-h.

La industria de la Unión Soviética, además de las pilas secas con despolarizante de manganeso, produce pilas secas con despolarización aérea de manganeso (CMBД). El despolarizante de estas pilas secas consta de una mezcla de grafito, carbón activo y mena de manganeso.

A diferencia de las pilas secas con despolarizante de manganeso, la parte superior del despolarizante en las pilas tipo CMBД está cubierta solamente por cartón. Tal estructura de la pila permite comunicarse al despolarizante con el ambiente mediante tubos de vidrio. De este modo la despolarización de estas pilas se efectúa tanto a cuenta del manganeso como del oxígeno del aire. La capacidad de las pilas CMBД es casi dos veces mayor que la de las pilas con

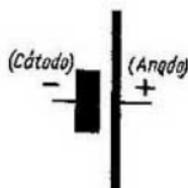


Fig. 58. Signo convencional de las fuentes químicas de tensión

despolarizante de manganeso. Durante el servicio de las pilas CMBД el electrolito se va evaporando a través de los tubos de vidrio. Para restaurar el funcionamiento de la pila se echa solución de amoníaco a través de los tubos de vidrio (unos 20 cm³ para cada pila). Se fabrican dos tipos de pilas con despolarización aérea de manganeso: 3CMBД (capacidad inicial 45 A-h; corriente de descarga nominal, 50 mA) y 6CMBД (capacidad inicial, 150 A-h; corriente de descarga nominal, 150 mA).

La industria de la Unión Soviética produce baterías de pilas secas BHC-100 destinadas a la alimentación de circuitos de calentamiento de las válvulas (batería seca de calentamiento con capacidad de 100 A-h; f.e.m. inicial 1,5 V; corriente de descarga máxima, 150 mA; consta de 12 pilas secas) y BHC-MBД-500 (consta de 4 pilas secas tipo CMBД; f.e.m. de 1,4 V; y capacidad de 500 A-h).

Para alimentar el circuito anódico de las válvulas se emplean baterías anódicas. Las más frecuentes son las baterías tipo БАС (batería anódica seca). Las pilas secas se emplean también para alimentar los circuitos de señalamiento, comunicaciones telefónicas, linternas de bolsillo (tipo КБС), etc.

Las pilas eléctricas y otras fuentes electroquímicas de energía, en los esquemas se designan convencionalmente, como se muestra en la fig. 58.

§ 42. Acumuladores eléctricos

Para alimentar los circuitos de control, aparatos de protección (relés), señales, automatización, alumbrado de emergencia, accionamientos y bobinas soportes de interruptores rápidos, mecanismos auxiliares en las plantas y subestaciones eléctricas, debe existir una fuente de energía eléctrica, cuyo funcionamiento no dependa del estado de los grupos principales de la planta o subestación eléctrica. Esta fuente de energía eléctrica debe garantizar el funcionamiento ininterrumpido y exacto de los circuitos mencionados, tanto durante el servicio normal de la planta eléctrica, como en caso de emergencia.

Como fuente de energía eléctrica para estos casos, en estaciones y subestaciones eléctricas, son utilizadas baterías de acumuladores. Estas últimas, cargadas a tiempo y con gran capacidad, pueden alimentar a los consumidores durante todo el tiempo que dure la avería.

Los acumuladores se emplean también para el alumbrado de automóviles, vagones ferroviarios, el movimiento de carros eléctricos y submarinos, para la alimentación de estaciones de radio y diversos instrumentos, en los laboratorios y otras necesidades.

El acumulador es un elemento secundario de generación de corriente eléctrica y, a diferencia de las pilas eléctricas puede dar energía eléctrica solamente después de una carga preliminar. Las pilas eléctricas generan energía sin carga preliminar y por eso han sido llamados antes elementos primarios. La carga del acumulador consiste en que éste se conecta a la fuente de corriente continua. Como resultado del proceso de electrólisis cambia el estado químico de las placas del acumulador y entre ellas se establece cierta diferencia de potencial.

La batería de acumuladores está formada de varios acumuladores de plomo o alcalinos.

§ 43. Acumuladores de plomo

El acumulador de plomo consta de varias placas positivas y negativas, sumergidas en un recipiente con electrolito. Como electrolito se emplea una solución de ácido sulfúrico en agua destilada. El peso específico de la solución es de 1,08 a 1,21.

Las placas de los acumuladores pueden ser de superficie y de masa. Las primeras se fabrican de plomo puro. Para aumentar la superficie de las placas, éstas se hacen con nervaduras.

Las placas de masa tienen la forma de una rejilla de plomo, cuyas células se llenan de óxidos de plomo (litargirio, minio). Para evitar que la masa salga de las células, la placa se reviste por ambas partes con hojas de plomo perforadas. Generalmente la placa positiva del acumulador es de superficie, y la negativa, de masa.

Las placas positivas, así como las negativas, se sueldan en dos bloques aislados uno del otro. Para que funcionen ambos lados de las placas positivas, su número debe superar el de las placas negativas en una unidad.

Los recipientes de los acumuladores de plomo se fabrican de vidrio; de madera revestida en el interior con chapas de plomo; de cerámica, ebonita y plástico.

Durante la producción de las placas de acumuladores, éstas se someten a un tratamiento electroquímico (moldeo), lo que conduce a que sobre las placas positivas se deposite el peróxido de plomo PbO_2 , y sobre las placas negativas, plomo puro (esponjoso) Pb .

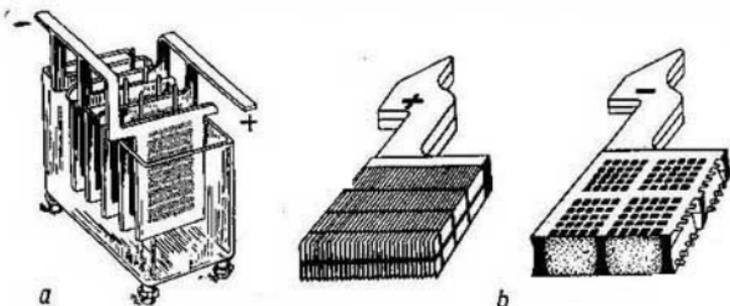
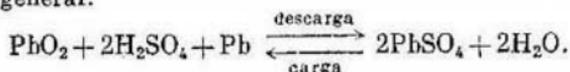


Fig. 59. Acumulador de plomo:
a — aspecto exterior, b — placas del acumulador

Su polaridad se puede determinar por el color: las placas positivas adquieren una coloración marrón-rojiza, y las negativas son de color gris.

En la fig. 59 se muestra el aspecto exterior del acumulador de plomo y de sus placas.

Las reacciones químicas que tienen lugar durante la descarga y carga del acumulador de plomo pueden representarse por una ecuación general:



Al descargar el acumulador es necesario leer la ecuación de izquierda a derecha y, al cargarlo, de derecha a izquierda.

Para cargar el acumulador, éste se conecta a la fuente de corriente continua (grupo convertidor o rectificador) y, variando la tensión, se mantiene una magnitud constante de la corriente de carga (fig. 60). La corriente de carga no debe superar la magnitud de la corriente de carga máxima del acumulador, indicada en la ficha técnica. Cuando una corriente de 2,3 a 2,4 V pasa por el elemento, se desprenden burbujas de gas en las placas. Después de esto se disminuye la magnitud de corriente eléctrica de carga en un

50-60% y, continuando la carga, se aumenta paulatinamente la tensión en cada elemento hasta 2,5-2,7 V.

En la fig. 61 se dan las curvas de carga y descarga del acumulador de plomo. En la curva de descarga se ve que tan pronto como el acumulador cargado se desconecta del dispositivo cargador, la tensión en sus bornes cae rápidamente desde 2,7 hasta 2,1 V. Al irse

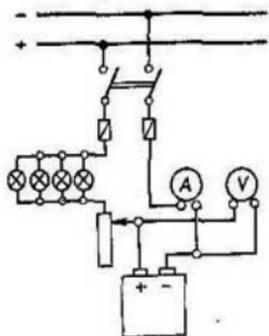


Fig. 60. Esquema de carga de un acumulador

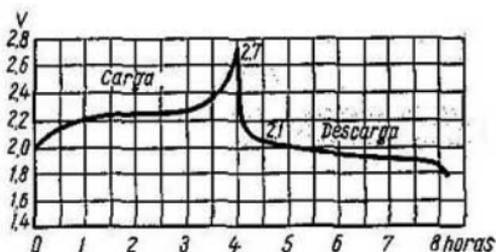


Fig. 61. Gráfica de carga y descarga de un acumulador de plomo

descargando el acumulador, la tensión por debajo de 1,9 V cae lentamente, y hasta 1,8 V, rápidamente. Para evitar el deterioro del acumulador, éste no debe descargarse por debajo de la tensión de

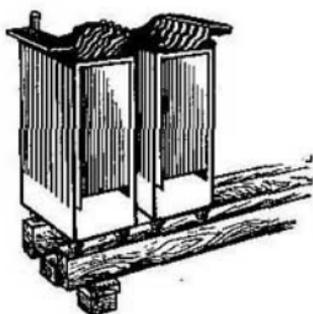


Fig. 62. Aspecto exterior de una batería de acumuladores

1,75 a 1,8 V, ya que el óxido de plomo de las placas (PbO), combinándose con el ácido sulfúrico H_2SO_4 produce un sulfato de plomo de grano grueso, difícilmente soluble, y agua:



lo cual disminuye bruscamente la densidad de la solución en el acumulador y dificulta las reacciones químicas. La transformación de la masa activa de las placas en sulfato de grano grueso se llama

sulfatación. Al funcionar, el acumulador pierde energía eléctrica por la autodescarga. Esta es provocada por impurezas accidentales depositadas en el electrólito que originan reacciones químicas adicionales y la pérdida de energía. La resistencia interna del acumulador de plomo no es grande, cerca de $0,001\Omega$ para el acumulador cargado, y aumenta al final de la descarga aproximadamente en dos veces.

El rendimiento del acumulador de plomo es de 75—84%.

En la fig. 62 se muestra el aspecto exterior de una batería de acumuladores.

§ 44. Acumuladores alcalinos

En las plantas y subestaciones eléctricas con el fin de economizar el plomo, en vez de acumuladores de plomo se emplean los alcalinos (acumuladores Edison).

Los acumuladores alcalinos pueden ser de dos tipos: de cadmio-níquel y ferro-níquel.

La masa activa de las placas positivas para ambos tipos de acumuladores alcalinos es el hidróxido de níquel. Para las placas negativas de los acumuladores de tipo CdNi, se usa como masa activa una mezcla de cadmio y hierro, y para los acumuladores de tipo FeNi, hierro químicamente puro.

Las placas de los acumuladores alcalinos son unas rejillas de acero niquelado con células en donde se colocan pequeños paquetes de acero niquelado perforado y muy fino (0,1 mm), en los cuales está prensada la masa activa. En los acumuladores FeNi el número de las placas negativas es mayor que el de las positivas en una unidad y el bloque de las primeras está unido con el cuerpo del recipiente.

En los acumuladores CdNi, el número de las placas positivas es mayor que el de las negativas en una placa y el cuerpo del recipiente está unido con el bloque de las placas positivas.

El acumulador alcalino dispone de un recipiente soldado de acero, en cuya tapa hay tres orificios: dos sirven para hacer pasar los bornes, y uno para cargar el electrólito y dar salida al gas.

Como electrólito de los acumuladores alcalinos se emplea el hidróxido de potasio (KOH) con peso específico de 1,18 a 1,20.

En la fig. 63 se muestra el aspecto exterior del acumulador alcalino.

Al descargarse el acumulador de ferro-níquel, los hidróxidos superiores se convierten en hidróxidos inferiores sobre las placas positivas, y el hierro químicamente puro, depositado en la placa negativa, en hidróxido de hierro.

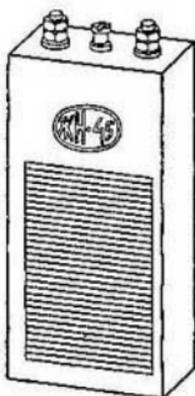
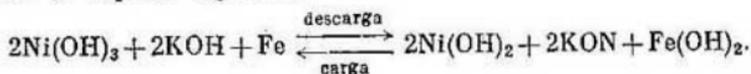
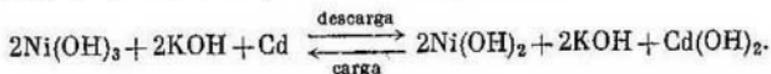


Fig. 63. Aspecto exterior de un acumulador alcalino

Durante la carga del acumulador tienen lugar las reacciones químicas inversas. La ecuación de las reacciones de descarga y carga tiene el aspecto siguiente:



Las reacciones químicas de descarga y carga para el acumulador alcalino de cadmio-níquel son las siguientes:



Al principio de la carga de un acumulador alcalino se suministra a cada elemento cerca de 1,55 V, después la tensión se aumenta gradualmente, llegando al final de la carga hasta 1,75–1,8 V.

La tensión de un acumulador alcalino, desconectado del dispositivo de carga, es aproximadamente igual a 1,25–1,3 V.

El acumulador alcalino puede ser descargado solamente hasta la tensión 1,0 a 1,1 V. Al descender la temperatura por debajo de la normal (+25°), la capacidad de los acumuladores alcalinos disminuye en un 0,5% por grado de descenso de la temperatura.

Los acumuladores alcalinos ofrecen las siguientes ventajas en comparación con los de plomo:

- 1) en su fabricación no se emplea el plomo;
- 2) disponen de gran resistencia mecánica: resisten altas corrientes de descarga, vibraciones, choques, cortocircuitos;
- 3) si quedan fuera de servicio durante un período prolongado, sufren pequeñas pérdidas por la autodescarga, no se deterioran y sirven durante largo tiempo;
- 4) durante su funcionamiento desprenden menor cantidad de gases nocivos y evaporaciones;
- 5) su peso es menor que el de los de plomo;
- 6) no exigen que personal calificado se ocupe continuamente de su mantenimiento.

En comparación con los acumuladores de plomo los alcalinos tienen los siguientes inconvenientes:

- 1) menor f.e.m.;
- 2) menor rendimiento (52–55%);
- 3) son más costosos.

§ 45. Conexión de los generadores de electricidad

Los generadores de electricidad (acumuladores, pilas secas) se conectan en serie, en paralelo y en forma mixta.

1. Conexión en serie de generadores eléctricos. En la fig. 64,a tenemos tres acumuladores conectados en serie. Tal conexión de

acumuladores tiene lugar cuando el signo menos de un acumulador se une con el signo más del siguiente, denominándose *conexión en serie*. Al grupo de acumuladores conectados entre sí se le denomina *batería*.

El esquema de la asociación en serie de tres acumuladores en una batería se muestra en la fig. 64, b. Puesto que las f.e.m. de los acumu-

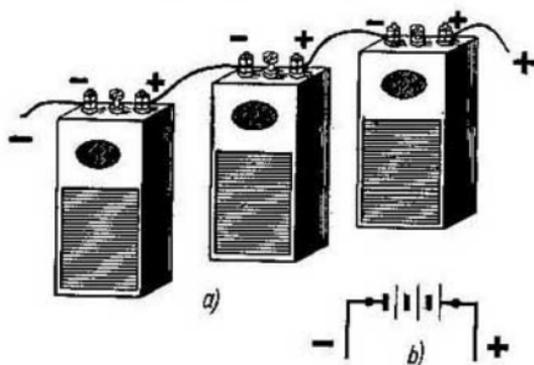


Fig. 64. Conexión en serie de acumuladores

ladores, en este caso, están orientadas en un sentido, la f.e.m. de toda la batería es igual a su suma:

$$E = E_1 + E_2 + E_3.$$

La resistencia interna de la batería es igual a la suma de las resistencias internas de cada acumulador:

$$R_0 = R_{01} + R_{02} + R_{03}.$$

Si la batería queda cerrada con la resistencia exterior R , la corriente en el circuito se puede hallar según la fórmula:

$$I = \frac{E}{R_0 + R} = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{R_{01} + R_{02} + R_{03} + R}$$

Los acumuladores se conectan en serie cuando la tensión del consumidor es más alta que la f.e.m. de un acumulador y la intensidad tiene una magnitud que no supera la corriente de descarga del acumulador.

Prácticamente en batería se unen los acumuladores de un mismo tipo, es decir, los que tienen la f.e.m., resistencias internas y capacidades iguales.

En este caso, la f.e.m. de una batería que consta de n acumuladores es igual a:

$$E_{\text{bat}} = En.$$

La resistencia interna de la batería es:

$$R_0 = R_{01}n.$$

La intensidad de la corriente de la batería cerrada con la resistencia exterior será:

$$I = \frac{En}{R_{01}n + R}.$$

Ejemplo 3. Una batería que consta de cinco acumuladores, cada uno de los cuales tiene una f. e. m. de 1,2 V y resistencia interna de 0,2Ω, está cerrada con una resistencia exterior de 11Ω. Determinar la intensidad de la corriente que entrega la batería a la red:

$$I = \frac{En}{R_{01}n + R} = \frac{1,2 \cdot 5}{0,2 \cdot 5 + 11} = 0,5 \text{ A.}$$

2. Conexión en paralelo de generadores eléctricos. Al unir entre sí todos los polos del mismo signo de varios acumuladores y componer un «más» y un «menos» comunes, se obtiene una conexión

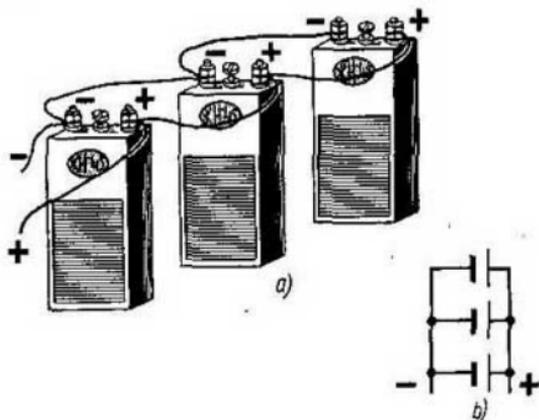


Fig. 65. Conexión en paralelo de acumuladores

en paralelo. En la fig. 65, a se muestra la conexión en paralelo de tres acumuladores y en la fig. 65, b está representado su esquema.

La condición indispensable para la conexión en paralelo de los acumuladores es la igualdad de sus f.e.m., resistencias internas y capacidades, ya que en caso contrario, entre los acumuladores pasarán corrientes de compensación dañosas para la batería.

La f.e.m. de la batería con la conexión en paralelo es igual a la f.e.m. de un acumulador:

$$E_{\text{bat}} = E_1 = E_2 = E_3 = \dots E_n.$$

Dado que cada acumulador crea una corriente en un sentido, la batería en total puede entregar a la red una corriente mayor que cada acumulador aislado.

La resistencia interna de la batería que se compone de n acumuladores unidos en paralelo será n veces menor que la resistencia de cada uno de éstos:

$$R_0 = \frac{R_{01}}{n}.$$

La corriente que entrega la batería a la red será:

$$I = \frac{E}{\frac{R_{01}}{n} + R}$$

La conexión de acumuladores en paralelo se emplea solamente cuando la tensión del consumidor es igual a la f.e.m. del acumulador y la corriente que necesita el consumidor es mayor que la de descarga de un acumulador.

Ejemplo 4. Determinar la corriente que entrega a la red una batería que consta de dos acumuladores conectados en paralelo, si la f. e. m. de cada uno es igual a 2 V y la resistencia interna es 0,02 Ω. La resistencia externa es 1,99 Ω:

$$I = \frac{E}{\frac{R_{01}}{n} + R} = \frac{2}{\frac{0,02}{2} + 1,99} = 1 \text{ A.}$$

3. Conexión mixta de generadores eléctricos. Combinando las conexiones en serie y en paralelo, obtendremos la *conexión mixta*. En la fig. 66, *a* está representada una conexión mixta de cuatro acumuladores de dos grupos en paralelo con dos elementos conectados en serie en cada uno, y en la fig. 66, *b* se muestra su esquema. La f.e.m. de una batería de acumuladores con conexión mixta es igual a la suma de las f.e.m. de los elementos conectados en serie en cada grupo (n)

$$E_{\text{bat}} = En$$

La resistencia interna de los acumuladores en el grupo es igual a

$$R_{0\text{gr}} = R_{01}n.$$

La resistencia interna de la batería que consta de m grupos es:

$$R_{0\text{bat}} = \frac{R_{0\text{gr}}}{m} = \frac{R_{01}n}{m}.$$

La corriente que entrega la batería al circuito con una resistencia de R ohmios es:

$$I = \frac{E_{\text{bat}}}{R_{0\text{bat}} + R} = \frac{En}{\frac{R_{01}n}{m} + R}$$

La conexión mixta de acumuladores se emplea cuando la tensión y la corriente del consumidor son mayores que la f.e.m. y la corriente de descarga de un acumulador.

Ejemplo 5. Tenemos una batería que consta de dos grupos con tres acumuladores en cada uno de ellos. La batería está cerrada con una resistencia de $1,65\Omega$; la f. e. m. de un acumulador es de $1,2\text{ V}$ y la resistencia interna es $0,1\Omega$.

$$i = \frac{En}{\frac{R_0 n^2}{m} + R} = \frac{1,2 \cdot 3}{\frac{0,1 \cdot 3}{3^2} + 1,65} = 2\text{ A.}$$

Hemos estudiado algunos casos de conexión de generadores eléctricos. Vamos a establecer a continuación qué método de conexión

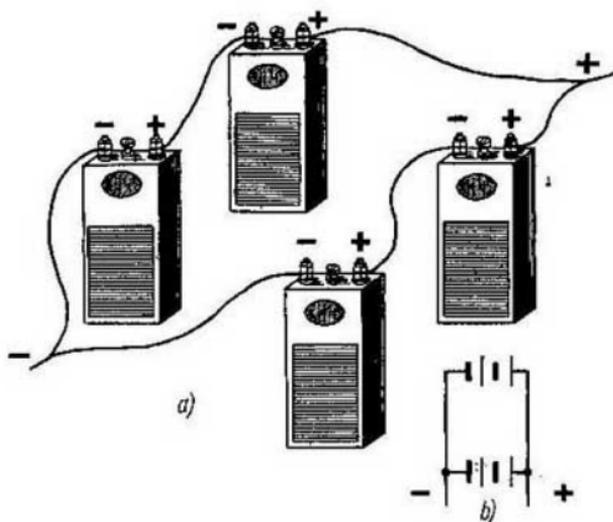


Fig. 66. Conexión mixta de acumuladores

es el más económico desde el punto de vista de la entrega máxima de potencia al circuito exterior. Matemáticamente resulta que para obtener la potencia útil máxima en el circuito eléctrico externo es necesario tener la igualdad de resistencias de las partes interna y externa del circuito:

$$R_0 = R.$$

Problemas

1. ¿Cuántos mg de zinc se desprenderán de una solución de sal de zinc al pasar por ésta 50 C de electricidad?
2. Por un baño con solución de sulfato de cobre pasa una corriente de 5 A durante 20 min . Determinar la cantidad de cobre desprendido de la solución.

3. Durante el niquelado, en calidad de ánodo está suspendida una placa de níquel de 20 g de peso. ¿Qué tiempo se necesitará para que se gaste la placa de níquel, si por la solución pasa una corriente de 10 A?

4. Una placa metálica de 2 dm² de área se cubre de una capa de zinc de 0,05 mm de espesor. ¿Qué tiempo durará el recubrimiento, si la corriente es igual a 1 A y el peso específico del zinc es de 7,1?

5. Un objeto metálico de 10 × 40 × 60 mm se recubre con plata. ¿Qué corriente hace falta dejar pasar para recubrir el objeto con capa de plata de 0,01 mm de espesor durante 0,5 h? El peso específico de la plata es de 10,5.

6. Hay una batería de cuatro acumuladores con la f. e. m. de 1,2 V y resistencia interna de 0,2Ω en cada uno. La batería está cerrada con una resistencia de 4Ω. Determinar la corriente de la batería cuando los acumuladores están conectados: a) en serie, b) en paralelo.

7. Cuatro acumuladores con f.e.m. de 1,2 V y resistencia interna de 0,3Ω cada uno están conectados en serie. La resistencia exterior es igual a 8,4Ω. Determinar las indicaciones del amperímetro y voltímetro en el circuito exterior.

8. Tres grupos paralelos, de cinco acumuladores conectados en serie en cada uno, trabajan para una red exterior con 4,995Ω de resistencia; la f. e. m. de cada acumulador es de 2 V, la resistencia interna es de 0,003Ω. Determinar la corriente, la tensión y la potencia de la batería.

Preguntas de control

1. ¿Qué es la electrólisis?
2. ¿De qué factores depende la cantidad de substancia que se deposita en los electrodos durante la electrólisis?
3. ¿Qué es equivalente electroquímico de la substancia?
4. ¿Cuál es la esencia de las leyes primera y segunda de Faraday?
5. Indicar la aplicación técnica de la electrólisis.
6. ¿Cuál es la construcción de una simple pila eléctrica?
7. ¿Cuál es la estructura de los acumuladores y cómo trabajan éstos?
8. ¿Cómo se unen entre sí las fuentes de tensión (generadores de electricidad)?

IV

EFFECTOS TERMICOS DE LA CORRIENTE ELECTRICA

§ 46. Calentamiento del conductor por la corriente eléctrica

Es sabido que cada cuerpo consta de moléculas, las cuales no se encuentran en estado de reposo, sino en continuo movimiento. Cuanto más alta es la temperatura del cuerpo, tanto más rápido es el movimiento de sus moléculas. Pero existe una temperatura en la que el movimiento de las moléculas cesa. Esta temperatura es igual a -273°C . Cero absoluto, así denominaron dicha temperatura los científicos. Tal temperatura no existe en la Tierra en las condiciones naturales. Se puede obtener una temperatura cercana a ésta solamente en el laboratorio.

En todo conductor por el cual fluye una corriente eléctrica, lo mismo que en todos los cuerpos, las moléculas están en movimiento. Cuando por el conductor fluye una corriente eléctrica, los electrones chocan contra las moléculas en movimiento e intensifican este movimiento, lo que a su vez provoca el calentamiento del conductor.

La cantidad de calor se mide en calorías (cal). Una caloría es la cantidad de calor necesaria para calentar 1 g de agua en 1°C . 1 kcal es igual a 1.000 cal.

Ejemplo 1. ¿Qué cantidad de calor se necesita para calentar 250 g de agua desde 10°C hasta la ebullición?

Razonemos del modo siguiente: para calentar 1 g de agua en 1°C se necesita 1 cal. Para calentar 250 g de agua en 1°C se necesitan 250 cal. Para calentar 250 g de agua desde 10°C hasta 100°C (o sea, 90°C), es necesario $250 \cdot 90 = 22.500 \text{ cal} = 22,5 \text{ kcal}$.

§ 47. Ley de Joule-Lenz

En los experimentos, ha sido establecido que la cantidad de calor desprendida en un conductor por la corriente eléctrica depende de la resistencia del mismo, de la intensidad de la corriente y del tiempo de su recorrido.

Esta ley física fue formulada por primera vez en 1841 por el físico inglés Joule y algo más tarde (en 1844) independientemente de él, por el académico ruso Emil Lenz (1804—1865).

Se llama ley de Joule-Lenz a las relaciones cuantitativas que tienen lugar durante el calentamiento del conductor por la corriente.

Lenz generalizó los experimentos relacionados con la inducción electromagnética exponiendo esta generalización en lo que se denominó «regla de Lenz». En sus obras dedicadas a la teoría de las máquinas eléctricas, Lenz estudió el fenómeno de la «reacción del inducido» en las máquinas de corriente continua y demostró el principio de reversibilidad de las máquinas eléctricas. Lenz, colaborando con Jacobi, analizó la fuerza de atracción de los electroimanes y estableció la relación entre el par magnético y la fuerza de magnetización.

Lenz fue miembro de la Academia de Ciencias de Petersburgo y rector de la Universidad de dicha ciudad.

Anteriormente ha sido establecido que:

$$1 \text{ kW} = \frac{1}{0,736} \text{ CV} = 1,36 \text{ CV},$$

de donde

$$1 \frac{\text{kgm}}{\text{seg}} = \frac{1}{75} \text{ CV} = \frac{736}{75} \text{ W} = 9,81 \frac{\text{J}}{\text{seg}};$$

$$1 \text{ J} = \frac{1 \text{ kgm}}{9,81} = 0,102 \text{ kgm}.$$

Ya que $1 \text{ cal} = 0,427 \text{ kgm}$, entonces

$$1 \text{ J} = \frac{0,102}{0,427} \text{ cal} = 0,24 \text{ cal}.$$

De este modo

$$1 \text{ J} = 0,24 \text{ cal}.$$

La energía de la corriente eléctrica se determina según la fórmula

$$A = I^2 R t \text{ J}.$$

Puesto que la energía de la corriente se consume en forma de calor, la cantidad del mismo desprendida por la corriente en el conductor es igual a:

$$Q = 0,24 I^2 R t \text{ cal}.$$

Esta fórmula que expresa la ley de Joule-Lenz muestra que la cantidad de calor en calorías que desprende la corriente al pasar por un conductor, es igual al coeficiente 0,24 multiplicado por el cuadrado de la intensidad en amperios, la resistencia en ohmios y el tiempo en segundos.

Ejemplo 2. Determinar qué cantidad de calor desprenderá una corriente de 6 A pasando durante 3 min por un conductor con resistencia de 2Ω .

$$Q = 0,24 \cdot I^2 R t = 0,24 \cdot 36 \cdot 2 \cdot 180 = 3110,4 \text{ cal}.$$

La fórmula de la ley de Joule-Lenz se puede escribir del modo siguiente:

$$Q = 0,24 \cdot I \cdot I \cdot R t,$$

puesto que $I \cdot R = U$, se puede anotar

$$Q = 0,24 \cdot I \cdot U \cdot t \text{ cal.}$$

Ejemplo 3. Un hornillo eléctrico está conectado a la red de 120 V de tensión. La corriente que recorre por la resistencia del hornillo eléctrico es de 5 A. Es necesario determinar qué cantidad de calor desprenderá la corriente en 2 horas.

$$Q = 0,24 \cdot I \cdot U \cdot t = 0,24 \cdot 5 \cdot 120 \cdot 7.200 = 1.036.800 \text{ cal} = 1.036,8 \text{ kcal.}$$

§ 48. Temperatura de calentamiento del conductor por la corriente eléctrica

Todos los conductores recorridos por una corriente eléctrica se calientan y entregan su calor al medio ambiente (aire, líquido, cuerpo sólido). La temperatura del conductor se elevará hasta que la cantidad de calor obtenida por éste resulte igual a la que entrega el conductor al medio ambiente. La temperatura de calentamiento del conductor depende de la intensidad de la corriente, la sección y el material del mismo y las condiciones de refrigeración. Para una intensidad de corriente y un material del conductor determinados, la temperatura de su calentamiento no depende de su longitud, ya que cuanto mayor es su longitud, tanto mayor es la superficie de refrigeración.

Si elegimos un conductor de un material determinado y lo colocamos en ciertas condiciones de refrigeración, el calentamiento de éste por la corriente eléctrica será tanto mayor, cuanto mayor es la densidad de la corriente en el conductor.

Con el fin de economizar el material, se trata de hacer pasar por el conductor la corriente máxima, pero para cada conductor existe una temperatura que no se puede superar durante su calentamiento debido a varias causas. Así, por ejemplo, los conductores que tienen aislación de goma y envoltura de tejido de algodón, no deben calentarse más de 50°C con el fin de preservar la aislación de posibles deterioros. Por eso, en dependencia de la sección, los conductores se eligen para una determinada densidad de corriente. Por ejemplo, la densidad máxima admisible para conductores y cables de cobre aislados no subterráneos, en función de la sección, se muestra en la tabla 10.

Como se ve en la tabla, al aumentar la sección de los conductores, disminuye la densidad de la corriente. Esto se explica del modo siguiente: los conductores de secciones reducidas, calentándose, entregan su calor al medio ambiente, mientras que las capas internas del conductor de mayor sección, calentándose, pueden transmitir su calor solamente a las capas vecinas que están ya calientes.

Los conductores sin aislamiento («desnudos»), en virtud de su mejor refrigeración, toleran mayores magnitudes de densidad de la corriente (tabla 11).

Tabla 10

**Densidad de corriente admisible para conductores
de cobre con aislamiento**

Sección, en mm ²	Intensidad, en A	Densidad de corriente, en A/mm ²	Sección, en mm ²	Intensidad, en A	Densidad de corriente, en A/mm ²
0,75	13	17,4	50	192	3,8
1	15	15,0	70	242	3,5
1,5	20	13,3	95	292	3,1
2,5	27	10,8	120	342	2,8
4	36	9,0	150	392	2,6
6	46	7,7	185	450	2,4
10	68	6,8	240	532	2,2
16	92	5,7	300	614	2,0
25	123	4,9	400	737	1,8
35	152	4,3			

Conviene señalar, que si un conductor de cobre con aislamiento, de 25 mm² de sección, admite una corriente de 123 A, la sección de un conductor de aluminio para la misma corriente será no de 25 mm², sino 1,5 veces mayor, porque en caso contrario el alambre se recalentará a consecuencia de la mayor resistencia específica del aluminio.

La energía de la corriente eléctrica que se gasta en calentar los conductores se pierde inútilmente. Por eso, al calcular los conductores hay que tratar de reducir las pérdidas térmicas hasta un 5 ó 10% de toda la energía.

Tabla 11

Densidad de corriente admisible para conductores sin aislamiento

Sección, en mm ²	En un local		A la intemperie	
	Intensidad, en A	Densidad de corriente, en A/mm ²	Intensidad, en A	Densidad de corriente, en A/mm ²
4	57	14,2	58	14,5
6	73	12,2	76	12,6
10	103	10,3	108	10,8
16	130	8,1	150	9,4
25	165	6,6	205	8,2
35	210	6,0	270	7,7
50	265	5,3	335	6,7
70	340	4,8	425	6,1
95	410	4,3	510	5,4

Pero no siempre el calentamiento del conductor es indeseable. Los efectos térmicos de la corriente eléctrica tienen mucha aplicación práctica, por ello el calor que desprende la corriente se trata de obtener frecuentemente en grandes cantidades. A continuación se describen algunos casos de aplicación práctica de los efectos térmicos de la corriente.

§ 49. Lámparas eléctricas de incandescencia

La lámpara de incandescencia fue inventada por el científico ruso A. Lodíguin, mostrándola por primera vez en 1873.

Alexandr Lodíguin nació en 1847 en la provincia de Tambov. Egresó del cuerpo de cadetes de la ciudad de Voronezh y de la escuela militar de oficiales de Moscú. Después de terminar el servicio militar consagró toda su vida a los trabajos de investigación. En 1873 inventó la lámpara de incandescencia y el mismo año hizo una demostración de alumbrado en las calles de Petersburgo por medio de lámparas de incandescencia con filamentos de carbón. Posteriormente Lodíguin perfeccionó la lámpara de incandescencia con filamentos metálicos. Le pertenece la prioridad de emplear el wolframio para fabricar el filamento de incandescencia. En 1880 no recibiendo apoyo material en la Rusia zarista para continuar sus experimentos, Lodíguin se dirige a Francia, y de allí, a los EE.UU., donde murió en 1923.

El principio de acción de las lámparas de incandescencia está basado en el intenso calentamiento del conductor (filamento de incandescencia) al pasar por éste una corriente eléctrica, irradiando el conductor, además de la energía térmica, la luminosa. Para evitar la combustión del filamento, éste se encierra en una ampolla de cristal, en cuyo interior se hace el vacío. Tal es la estructura de las así llamadas lámparas al vacío. Primeramente, en calidad de filamento de incandescencia, se empleó el carbón obtenido por medio de la calcinación de fibras vegetales. Las lámparas con este filamento irradiaban una luz débil, de color amarillo, consumiendo al mismo tiempo una gran energía. El filamento de carbón calentándose hasta 1.700°C se consumía gradualmente, lo que conducía a que la lámpara se echase a perder muy pronto. Actualmente las lámparas con filamento de carbón no se utilizan.

Actualmente, en las lámparas de incandescencia, el filamento de carbón se sustituye por un alambre fabricado de metales refractarios: osmio y wolframio (fig. 67). El filamento de wolframio, calentándose, en las lámparas al vacío, hasta una temperatura de 2.200°C irradia una luz más intensa y consume menos energía que el filamento de carbón.

El filamento de incandescencia se consumirá menos si llenamos el recipiente de cristal (ampolla) con un gas que no mantiene la combustión, por ejemplo, nitrógeno o argón. Tales lámparas se llaman lámparas de gas. El filamento de esta lámpara puede calentarse hasta 2.800°C .

La industria de la Unión Soviética produce lámparas de incandescencia de alumbrado eléctrico para tensiones de 36, 110, 127, 220 V. Para fines especiales se fabrican también lámparas de incandescencia de otras tensiones.

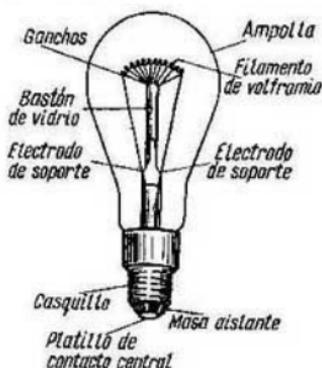


Fig. 67. Lámpara de incandescencia

Las lámparas de incandescencia tienen un rendimiento muy bajo. Solamente un 4 ó 5% de toda la energía eléctrica consumida por la lámpara se convierte en luz: la energía restante se transforma en calor.

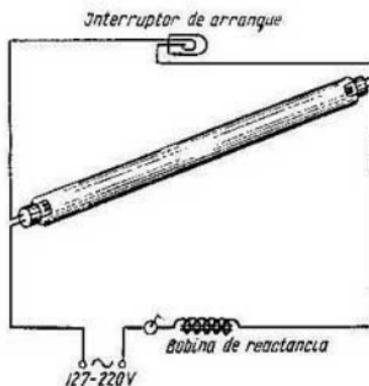


Fig. 68. Esquema de conexión de una lámpara luminiscente

En la actualidad se usan ampliamente lámparas luminiscentes. En ellas se aprovecha la propiedad de los gases enrarecidos de irradiar luz al pasar por ellos la corriente eléctrica. La luz emitida por una lámpara luminiscente depende de la naturaleza del gas. El neón da una luz rojo-anaranjada; el argón, azul-violeta; el helio, amarillo-rosa. Las lámparas luminiscentes se alimentan con corriente

alterna de alta tensión, obtenida mediante transformadores. Estas lámparas se emplean para decorar letreros, anuncios luminosos, iluminaciones.

La industria de la Unión Soviética produce también lámparas en cuyos tubos de cristal se encuentra vapor enrarecido de mercurio. El vapor de mercurio irradia una luz débil al ser recorrido por una corriente eléctrica.

La superficie interior del tubo de esta lámpara está cubierta con una sustancia especial, luminóforo, que emite luz por efecto luminoso del vapor de mercurio.

Actualmente se fabrican tres tipos de lámparas luminiscentes: lámparas de luz diurna, que se usan para alumbrar los lugares donde es necesario diferenciar los colores: en las industrias poligráficas, de tejidos de algodón, etc.; lámparas de luz blanca, para iluminar los locales industriales, oficinas y viviendas; lámparas de luz blanca suave, para alumbrar museos, teatros y galerías de pinturas. El rendimiento de las lámparas luminiscentes es 4 veces mayor que el de las de incandescencia comunes y corrientes.

En la fig. 68 está representado el esquema de conexión de una lámpara luminiscente a la red.

§ 50. Arco eléctrico

Si tomamos los extremos de dos conductores conectados a los polos de una fuente de corriente eléctrica y los aproximamos suficientemente, entre ellos se producirá una chispa. Los extremos de



Fig. 69. Arco eléctrico

los conductores se calentarán debido al mal contacto y, si ahora los separamos, la chispa se convertirá en un arco (fig. 69) creando una luz intensa y pegadora.

El arco eléctrico fue obtenido por primera vez en 1802 por el académico ruso V. Petrov. Generalmente, en calidad de conductores para obtener un arco eléctrico se toman barras de carbón que no se funden a las altas temperaturas desarrolladas por el arco. La temperatura de un arco eléctrico puede alcanzar 3.500°C, que es suficiente para fundir la mayoría de las sustancias más refractarias.

Al alimentar el arco eléctrico con corriente continua, el carbón positivo se destruye más rápidamente que el negativo, y en el centro de la barra de carbón positivo, al quemarse rápidamente, se forma una cavidad (cráter). Por eso, el carbón positivo, cuando la corrien-

te es continua, se toma habitualmente dos veces más grueso que el negativo.

Cuando la corriente es alterna, el espesor de las barras es el mismo. Si en el interior de las barras colocamos unas varillas de sales de diferentes metales, se puede variar el color de la luz del arco.

Al actuar el arco, los extremos de los carbones se queman y la distancia entre éstos aumenta. Para que el arco no se apague es necesario ir aproximando continuamente los carbones. Prácticamente, esta aproximación se efectúa bien con un regulador manual (linternas de proyección) o bien, con un regulador automático (reflectores).

Los primeros reguladores automáticos de arco eléctrico, así como los reguladores que reaccionan a la variación de la intensidad o tensión de la corriente, fueron construidos por el inventor ruso V. Chíkolev (1845-1898).

Para que el arco eléctrico arda suave y uniformemente es necesario mantener una tensión de 40 a 60 V y una intensidad de 10 a 12 A y más. Si la fuente que alimenta el arco eléctrico tiene una tensión mayor que la necesaria para éste, el exceso de la tensión se extingue en una resistencia adicional conectada en serie con el dispositivo del arco.

Ejemplo 4. Determinar la magnitud de la resistencia adicional para una lámpara de arco de un aparato cinematográfico que necesita una tensión de 50 V y una intensidad de 12 A. La tensión del generador es de 110 V (fig. 70).

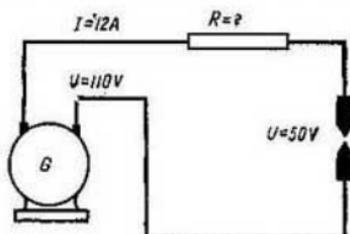


Fig. 70. Para el ejemplo 4

La caída de tensión en la resistencia adicional será:

$$110 - 50 = 60 \text{ V.}$$

La caída de tensión de 60 V en la resistencia adicional, siendo la intensidad de la corriente 12 A, puede tener lugar cuando la resistencia sea:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{60}{12} = 5 \Omega.$$

El arco eléctrico fue empleado por primera vez para fines de alumbrado por el ingeniero ruso P. Yablochkov (1847-1894), que inventó una «bujía eléctrica».

Pavel Yablochkov nació en 1847 en la provincia de Saratov. En 1886 terminó la escuela de ingenieros de la ciudad de Petersburgo. Se dedicaba a la elaboración y propagación de su «bujía»; propuso un nuevo sistema de distribución de la corriente eléctrica por medio de bobinas de inducción. Yablochkov fue el primero en aplicar la corriente eléctrica en la electrotecnia práctica, inventor del transformador y creador del elemento termoeléctrico. Yablochkov vivió mucho tiempo en el extranjero. Regresó a Rusia en 1893 y en 1894 murió en la ciudad de Saratov.

La «bujía» de Yablochkov consta de dos carbones colocados uno junto al otro y separados por una junta de arcilla cocida (caolín). A medida que se van quemando los carbones, la junta se funde, quedando la distancia entre los carbones constante.

Debido a la gran intensidad luminosa, el arco eléctrico encontró su aplicación en reflectores para alumbrar objetos lejanos, a veces a varios kilómetros.

El calor creado por el arco eléctrico se utiliza en los hornos de arco eléctrico. En estos hornos se logra fundir la mayor parte de las substancias refractarias.

§ 51. Soldadura eléctrica

Existen dos tipos de soldadura eléctrica: 1) soldadura por arco eléctrico y 2) soldadura por resistencia.

Soldadura por arco eléctrico fue inventada por el ingeniero ruso N. Benardos en 1882.

Nikolai Benardos (1842—1905) inventó, además de la soldadura eléctrica de metales, un método de recubrimiento electrolítico con cobre de los cuerpos de naves de hierro. Benardos fue el constructor de un soldador eléctrico a gas combinado. Por primera vez empleó el arco eléctrico para cortar los metales sumergidos en agua. Benardos recibió el título de ingeniero electricista honorífico.

En la soldadura eléctrica por arco se utiliza el calor que desprende el arco eléctrico. Durante la soldadura, según el método de Benardos, un polo de la fuente de tensión se conecta a la barra de carbón, y el otro, a las piezas que deben ser soldadas (fig. 71). En la llama del arco eléctrico se introduce una varilla metálica fina que se funde, y las gotas del metal fundido, cayendo sobre las piezas y enfriándose, forman la costura de la soldadura.

En 1891 el ingeniero ruso N. Slavianov propuso otro método de soldadura eléctrica por arco que adquirió gran difusión.

En 1893, en la Exposición Universal, Slavianov recibió una medalla de oro por el método de soldadura eléctrica bajo una capa de vidrio machacado (fundente).

La soldadura según el método de Slavianov consiste en lo siguiente: la barra de carbón es sustituida por un electrodo metálico (fig. 72). Se funde el electrodo mismo, y el metal fundido, solidificándose, une las piezas que se sueldan. Una vez consumido el electrodo, éste se sustituye por otro nuevo.

Antes de soldar una pieza, ésta se ha de limpiar cuidadosamente de herrumbre, orín, aceite y suciedad con un cortafrio, lima o papel de esmeril.

Para formar un arco estable y obtener una costura sólida, los electrodos metálicos se recubren (electrodos recubiertos) con sustancias especiales, que se funden también durante la fusión del

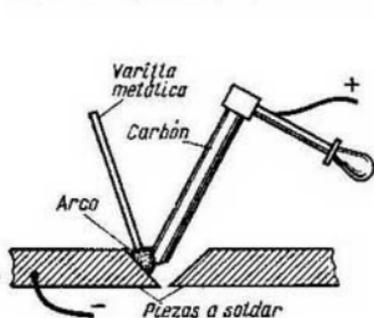


Fig. 71. Soldadura eléctrica según el método de Bernardos (con electrodo de carbón)

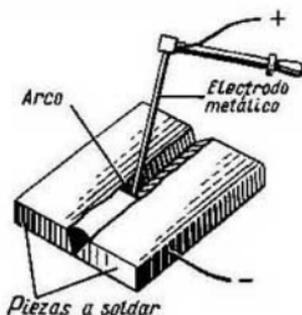


Fig. 72. Soldadura eléctrica según el método de Slavianov (con electrodo metálico)

electrodo, y las cuales, cubriendo las superficies fuertemente calentadas, de las piezas que se sueldan, no les permiten oxidarse.

Soldadura por resistencia. Si aproximamos mucho dos barras metálicas y dejamos pasar por éstas una potente corriente eléctrica, las mismas se calentarán hasta una alta temperatura y se soldarán debido al desprendimiento de calor en los puntos de contacto (gracias a la gran resistencia de transición).

Actualmente la soldadura eléctrica, tanto por arco, como por resistencia ha ocupado una posición sólida en la industria y ha adquirido una difusión muy amplia. Se suelda el acero de chapas y angular, vigas y rieles, mástiles y tubos, armazones y calderas, barcos, etc. Mediante la soldadura se fabrican piezas nuevas y se reparan de acero, hierro fundido y metales no ferrosos.

Los científicos e inventores de la Unión Soviética han elaborado numerosos métodos nuevos para la aplicación de la soldadura eléctrica. El profesor K. Jrenov ha propuesto el método de soldadura eléctrica submarina que se utilizó ampliamente en la construcción del gasoducto de Saratov a Moscú. La soldadura automática propuesta por el académico E. Patón permite soldar, con gran rapidez y alta calidad, metales en la producción en masa. El académico V. Nikitin ha creado un aparato de soldadura eléctrica que funciona por medio de la corriente alterna. El aparato tiene una pieza especial, oscilador, destinada para generar una corriente alterna de alta tensión y de muy alta frecuencia, lo que garantiza la estabi-

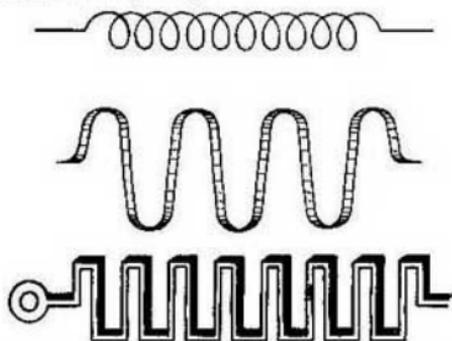
lidad del arco eléctrico al soldar piezas metálicas, tanto finas, como gruesas.

Al cerrar y abrir los circuitos eléctricos mediante un interruptor de cuchilla o un interruptor corriente, así como al conectar y desconectar los contactos de los instrumentos y aparatos, la chispa eléctrica que surge entre los contactos y a menudo el arco eléctrico que aparece después, funde el metal y los contactos se queman o se sellan, perturbando el servicio del dispositivo. Este fenómeno se llama erosión eléctrica (de la palabra latina «erodere»-roer). La chispa que surge «roe» el metal. Para eliminar la chispa a veces se intercala entre los contactos en paralelo un condensador de capacidad determinada.

Los ingenieros B. Lazarenko e I. Lazarenko han utilizado la propiedad de la chispa eléctrica de «roer el metal» en una instalación de erosión eléctrica construida por ellos. El funcionamiento de la instalación consiste, fundamentalmente, en lo siguiente. A una barra metálica se une un conductor que llega desde la fuente de corriente. El otro conductor se conecta a la pieza a elaborar que se halla en aceite. La barra metálica se hace vibrar. La chispa eléctrica que surge entre la barra y la pieza «roe» esta última, perforando en ella un agujero cuya forma es idéntica a la de la sección de la barra (hexagonal, cuadrada, triangular, etc.).

§ 52. Aparatos eléctricos de calefacción

Los aparatos eléctricos de calefacción han adquirido gran difusión en las aplicaciones domésticas (hornillos, teteras, cazuelas, planchas, calentadores eléctricos, etc.) y en la técnica (hornos y crisoles, armarios secadores, etc.).



[Fig. 73. Modelos de resistencias de calentadores

La parte principal de cada aparato eléctrico calefactor es un conductor que desprende calor cuando lo recorre una corriente eléctrica. El conductor, más a menudo, se arrolla en forma de espiral,

que se envuelve en una base resistente al calor o refractaria de cerámica, asbesto, mica, etc. Como material para las resistencias que se calientan al aire (fig. 73) se usa generalmente el nicromo. El alambre para los calentadores que se sumergen en agua se fabrica frecuentemente de reotano o niquelina. Si se deja pasar la corriente eléctrica por tales calentadores, al sacarlos del agua, se funden, ya que siendo el aire de menor conductividad térmica que el agua, no puede disipar rápidamente el calor desprendido.

§ 53. Relés térmicos

La parte principal del relé térmico la constituye una lámina bimetalica. La palabra «bimetalica» significa que la placa consta de dos metales.

Si tomamos dos láminas de un mismo metal y las calentamos, éstas se dilatarán igualmente (fig. 74,a). Pero si tomamos láminas de distintos metales y las calentamos, a consecuencia de la diversa dilatación térmica, éstas se alargarán desigualmente (fig. 74,b).

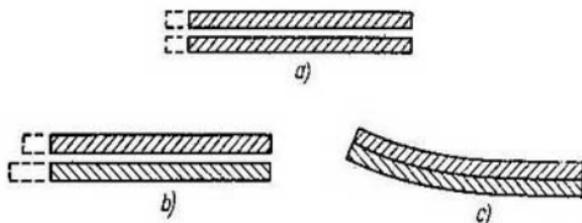


Fig. 74. Dilatación térmica de placas metálicas durante el caldeo

Dos láminas de metales diferentes, remachadas o soldadas, forman una placa bimetalica. Generalmente la placa bimetalica se fabrica de invar (aleación de hierro y níquel) y latón. Al calentar la placa, ésta se curva hacia el metal con menor dilatación térmica (fig. 74,c).

En la fig. 75 se muestra esquemáticamente la construcción de un relé térmico. Vamos a estudiar más detalladamente su trabajo.

El electromotor se conecta mediante el botón «arranque» 2. Al apretar el botón «arranque», la bobina magnética 5 une los contactos de fase 6 en el circuito principal del motor y éste empieza a funcionar.

La resistencia de calentamiento 1 del relé térmico se calienta debido a la corriente del motor. La placa bimetalica 2 dispuesta junto a la resistencia se calienta también, pero el relé térmico se elige de modo que, en el régimen normal, la cantidad de calor que desprende la resistencia no sea capaz de curvar la placa bimetalica.

Tan pronto como el motor eléctrico reciba una sobrecarga y empiece a tomar de la red una corriente mayor que la normal, el devanado del motor se recalienta y puede quemarse. Precisamente en este

momento comienza a funcionar el relé térmico. La cantidad de calor desprendida por la resistencia *1* aumenta en caso de sobrecargas prolongadas y peligrosas del motor. La placa bimetalica *2*, calentándose intensamente se combará y, encorvándose hacia arriba, dejará libre la palanca *3*, que antes estaba retenida por la placa. La palanca retenida constantemente por el resorte *4*, girando abrirá los contactos *7* y, de este modo, desconectará el circuito de la bobina magnética *5*, la cual desconectará a su vez los contactos principales de fase *6* en el circuito del motor. El motor se parará. Por consiguiente, el relé térmico protege el motor contra la sobrecarga.

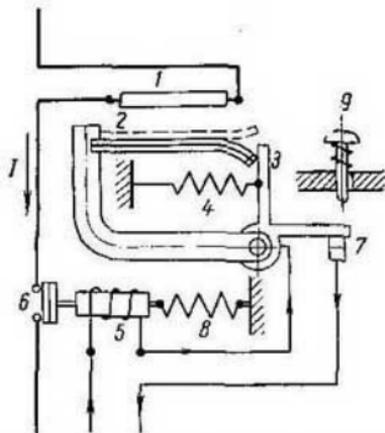


Fig. 75. Esquema de un relé térmico

Para arrancar nuevamente el motor, es necesario cerrar primeramente los contactos *7*, haciendo girar a mano la palanca *3* mediante un botón especial «reposición» *9*. Sin embargo, la palanca *3* volverá a su sitio solamente después de que la placa bimetalica se enfríe, regrese a su posición inicial (de 0,5 a 3 min después de la parada) y retenga la palanca. Sólo después de esto el cierre del botón «arranque» provocará la conexión del motor. La parada del motor en caso de necesidad efectúa el botón «stop».

§ 54. Fusibles

El fusible es un alambre o lámina de cobre, plomo o plata de fácil fusión y que se intercala en un circuito. Por su estructura los fusibles se dividen en:

1) de tapón (fig. 76, a); 2) de cinta (de galga) (fig. 76, b) y 3) de cartucho (fig. 76, c).

En los fusibles de tapón elemento fusible *1* se encierra en la capsula de porcelana *2*, que se enrosca o se fija en la base *3*, unida con

los conductores 4 y 5 del circuito que debe ser desconectado. El elemento fusible 6 de los fusibles de cinta tiene en sus extremos los terminales 7 y 8, que se aprietan con tornillos fijados sobre una base aislante y unidos con los conductores de la red que se desconecta. En los de cartucho el elemento fusible está alojado en el interior de tubos de porcelana 9 fácilmente desarmables.

Los fusibles se eligen y se intercalan de tal modo, que tan pronto como la corriente en el circuito rebasa, por una u otra causa, el máximo valor admisible, el elemento fusible se fundirá y abrirá el circuito.

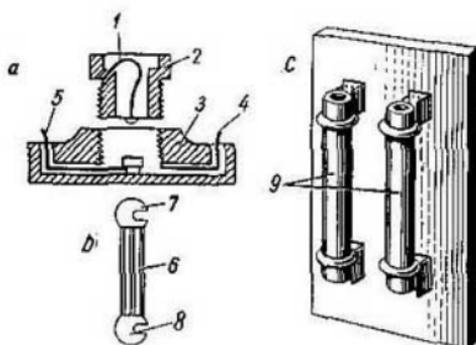


Fig. 76. Fusibles

Un fusible bien calculado para la red eléctrica debe fundirse siempre antes que se calienten peligrosamente los conductores de la misma.

En la tabla 12 se dan los datos para elegir la corriente nominal del fusible para conductores con aislamiento de goma, colocados en un tubo; para cables bifilares y trifilares con aislamiento de goma, y conductores tubulares ТПФ.

Tabla 12

Corriente nominal de los fusibles

Sección del conductor, en mm ²	Corriente nominal de los fusibles, en A	Sección del conductor, en mm ²	Corriente nominal de los fusibles, en A
1	10	25	100
1,5	10	35	125
2,5	20	50	160
4	25	70	200
6	35	95	225
10	60	120	260
16	80	150	300

§ 55. Conexión de los conductores

Si los conductores están mal conectados, a consecuencia de la gran resistencia de transición, el lugar de conexión se calienta intensamente y puede quemarse. Para evitarlo, al conectar los conductores, sus extremos se limpian minuciosamente, se estafian, se retuercen y el lugar de conexión se suelda. Al empalmar los extremos de las barras colectoras de cobre, aluminio o hierro hay que limpiarlos

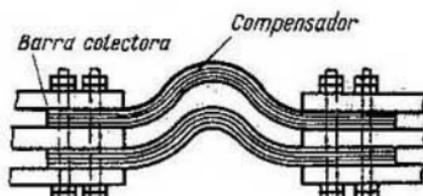


Fig. 77. Compensador

de herrumbre y óxido con una lima, y pulirlos con una tela de esmeril, después de lo cual se ponen una sobre otra y se aprietan, fijándolas mediante pernos.

Para evitar la oxidación, el lugar de conexión se engrasa cuidadosamente con vaselina técnica pura.

En sectores rectilíneos largos (más de 15 m para barras colectoras de aluminio y más de 25 m para las de cobre) se instalan compensadores. Los compensadores se fabrican del mismo material que las barras colectoras, pero de láminas independientes de 0,4—1 mm de espesor cada una (fig. 77). Los compensadores no permiten encorvarse a las barras colectoras en caso de dilatación térmica.

§ 56. Termoelectricidad. Pares termoeléctricos

A continuación veremos a qué se denomina *termoelectricidad*. Si tomamos dos metales heterogéneos, soldamos dos de sus extremos, y los otros dos los conectamos a un galvanómetro, al calentar el lugar de unión de los metales, el galvanómetro indicará la presencia de corriente eléctrica en el circuito. El conjunto de dos metales, utilizado en este caso se llama *par termoeléctrico* o *termoelemento*. La corriente eléctrica que surgió en el circuito se llama *termoelectricidad* y la *f. e. m.* que genera esta corriente se denomina *fuerza termoelectromotriz*.

La fuerza termoelectromotriz (*f. t. e. m.*) es siempre muy pequeña, aproximadamente proporcional a la diferencia de temperaturas del lugar soldado y del ambiente. A continuación se da la tabla de las fuerzas termoelectromotrices en voltios de algunos pares de meta-

les, siendo la diferencia de temperaturas del lugar soldado y del ambiente de 100°C (tabla 13).

El signo + significa que la corriente eléctrica va del primer metal al segundo por el lugar de soldadura calentado. La aplicación más importante de los termoelementos consiste en la medición de la temperatura. El termómetro, cuyo funcionamiento se basa en el empleo de los pares termoelectricos, está construido del modo siguiente. En un tubo de porcelana se colocan dos alambres (por ejemplo, de platino y de platino y rodio). El punto de la soldadura de los

Tabla 13

Fuerza termoelectromotriz de los termoelementos

Metales soldados	Magnitud de la f.e.m., en V
Antimonio—bismuto	-0,011
Cobre—hierro	+0,001
Cobre—constantán	-0,0047
Plata—constantán	-0,0041
Plata—níquel	-0,0024
Platino—platino y rodio (aleación con 90% de platino y 10% de rodio)	-0,001

alambres se introduce en la zona de alta temperatura. Los extremos libres de los alambres se conectan a los bornes del galvanómetro, cuya escala tiene divisiones en grados Celsius. Los pares termoelectricos pueden medir temperaturas altas (hasta 2.000°C y más) y bajas. La exactitud de los termoelementos es mayor que la de otros tipos de termómetros.

Problemas

1. ¿Qué calor desprenderá durante una hora una corriente de 5 A al pasar por la resistencia de una plancha eléctrica, si su resistencia es de 24Ω ?

2. La f. e. m. de un acumulador es de 2 V, la resistencia interna de $0,5\Omega$. Los terminales del acumulador están cerrados con un conductor de $3,5\Omega$ de resistencia. Determinar qué calor desprenderá la corriente en el conductor durante 0,5 h.

3. Dos lámparas eléctricas de 250 y 100Ω de resistencia están conectadas a una red de 100 V de tensión. Determinar qué calor desprenderá durante 3 min la corriente en cada lámpara, si ellas están conectadas: a) en serie, b) en paralelo.

4. La resistencia de un hornillo eléctrico está hecha de alambre de nicromo de $0,5\text{ mm}^2$ de sección y es de 10 m de longitud. Determinar qué calor desprenderá la corriente durante 10 min, si el hornillo está conectado a una red de 110 V de tensión.

5. Tres conductores de 2, 3 y 6Ω de resistencia están conectados entre sí en paralelo. La corriente total es igual a 18 A. Determinar qué calor desprenderá la corriente en cada conductor por segundo.

6. La f. e. m. de un generador de corriente es de 20 V, su resistencia interna es de $0,2\Omega$. A la red exterior está conectado un calentador eléctrico de alambre de níquelina de $0,2\text{ mm}^2$ de sección y 10 m de longitud. ¿Qué calor desprenderá la corriente en el calentador durante 1 hora?

7. Es necesario calcular un hornillo eléctrico que pueda hacer hervir 2,5 litros de agua a la temperatura de 10°C durante 40 min. Las pérdidas de calor para calentar el hornillo, la tetera y el aire son iguales a 40%. La resistencia del hornillo es de nicromo, de $0,5\text{ mm}^2$ de sección. ¿Qué longitud de alambre de nicromo hay que tomar si el hornillo se conecta a una red de 120 V de tensión?

Preguntas de control

1. ¿Qué expresa la ley de Joule-Lenz y cuál es su fórmula?
2. ¿Qué significa el factor 0,24 en la fórmula de la ley de Joule-Lenz?
3. ¿Cuál es la aplicación práctica de los efectos térmicos de la corriente eléctrica?
4. ¿Cuál es la aplicación de los fusibles? ¿Cuál es su estructura?
5. ¿Cuál es la estructura de los relés térmicos y dónde se emplean?
6. ¿Cómo se realiza la soldadura por corriente eléctrica?
7. ¿Qué es densidad de corriente y por qué para grandes secciones de los conductores ésta disminuye?
8. ¿De qué causas depende el calentamiento de un conductor?
9. ¿Qué es la termoelectricidad y dónde se aplica en la técnica?