V

ELECTROMAGNETISMO

§ 57. Campo magnético alrededor de un conductor rectilíneo con corriente

En el primer capítulo hemos estudiado un aspecto del campo electromagnético, el campo eléctrico. Ahora vamos a analizar otro aspecto del campo electromagnético que se llama c a m p o m a g n é t i c o.

Si se acerca una aguja magnética a un conductor rectilíneo con corriente eléctrica, aquélla tiende a colocarse perpendicularmente al plano que pasa a través del eje del conductor y del centro de rotación de la aguja. Esto indica que sobre la aguja actúan fuerzas especiales que se denominan fuerzas magnéticas. El campo magnético, además de actuar sobre la aguja magnética, influye en las partículas cargadas móviles y en los conductores con corriente que están en el campo magnético. En los conductores que se mueven en un campo magnético, o en los conductores inmóviles que se encuentran en un campo magnético variable, surge una f. e. m. inducida.

De acuerdo con lo dicho anteriormente podemos dar la siguiente definición del campo magnético.

Una de las dos partes del campo electromagnético, excitada por las cargas eléctricas de las partículas móviles y por la variación del campo eléctrico, que se caracteriza por la acción de la fuerza sobre las partículas cargadas móviles, y por lo tanto, sobre las corrientes eléctricas, se llama campo magnético.

Si atravesamos una hoja de cartón con un conductor grueso por el cual pasa una corriente eléctrica, las limaduras de acero echadas sobre la hoja de cartón se agruparán alrededor del conductor en circunferencias concéntricas que representan en este caso las así llamadas l í n e a s m a g n é t i c a s o e s p e c t r o m a g n é t i c o d e i n d u c c i ó n (fig. 78). Podemos desplazar la hoja hacia arriba o abajo a lo largo del conductor, pero la disposición de las limaduras de acero no cambiará. Por consiguiente, el campo magnético surge alrededor del conductor a lo largo de toda su longitud.

Si colocamos sobre el cartón pequeñas agujas magnéticas se puede ver que, variando la dirección de la corriente eléctrica en el conductor, las agujas magnéticas girarán (fig. 79). Esto indica que

el sentido de las líneas magnéticas de inducción cambia al variar la dirección de la corriente en el conductor.

Las líneas magnéticas de inducción alrededor del conductor disponen de las siguientes propiedades: 1) las líneas magnéticas

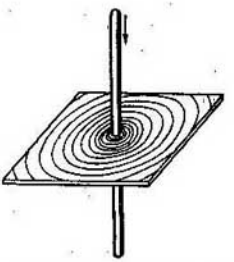


Fig. 78. Campo magnético alrededor de un conductor con corriente

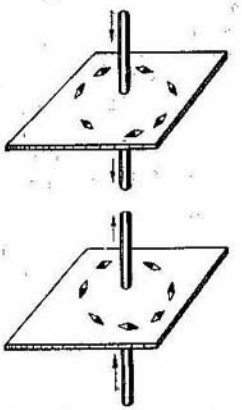


Fig. 79. Dirección de las líneas magnéticas de inducción

de inducción de un conductor rectilíneo tienen forma de circunferencias concéntricas; 2) cuanto más cerca del conductor se encuentren las líneas magnéticas de inducción, tanto mayor será su densidad; 3) la inducción magnética (intensidad del campo) depende de



Fig. 80. Signos convencionales de la dirección de la corriente en los conductores

la magnitud de la corriente en el conductor; 4) el sentido de las líneas magnéticas de inducción depende de la dirección de la corriente en el conductor.

Para indicar la dirección de la corriente, en un conductor representado como sección, se han adoptado designaciones convencio-

nales que en lo sucesivo vamos a utilizar. Si nos imaginamos que en el conductor hay una flecha colocada en la dirección da la corriente (fig. 80), entonces en el conductor donde la corriente está dirigida desde nosotros, veremos la cola de la flecha (una cruz); si la corriente está dirigida hacia nosotros, veremos la punta de la flecha (punto).

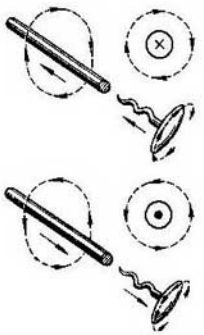
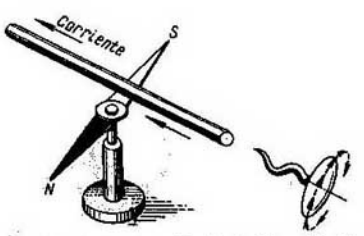


Fig. 81. Determinación de la dirección de las líneas magnéticas de inducción alrededor de un conductor con corriente, según la «regla del sacacorchos»

El sentido de las líneas magnéticas de inducción alrededor del conductor con corriente se puede determinar por la «regla del sacacorchos». Si el sacacorchos con rosca derecha avanza en el sentido de la corriente, la dirección de rotación del mango coincidirá con el sentido de las líneas magnéticas de inducción alrededor del conductor (fig. 81).

Una aguja magnética introducida en el campo de un conductor se orienta a lo largo de las líneas magnéticas de inducción. Por eso, para determinar su sentido se puede usar también la «regla del sacacorchos» (fig. 82). El campo magnético es una de las más importantes manifestaciones de la corriente eléctrica y no puede ser obtenido independiente y separadamente de ésta. *El campo magnético se caracteriza por el vector de inducción magnética, el cual tiene, por consiguiente, una magnitud y una dirección determinadas en el espacio.*



ig. 82. Determinación de la dirección de esviación de la aguja magnética acercada un conductor con corriente, según la «regla del sacacorchos»

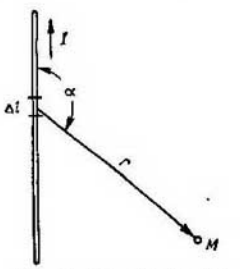


Fig. 83. Para la ley de Biot y Savart

Como resultado de la generalización de los datos experimentales fectuada por Biot y Savart, fue determinada la expresión cuantitativa de la inducción magnética (fig. 83). Midiendo los campos nagnéticos de las corrientes eléctricas de diversas magnitudes y for-

mas según la desviación de la aguja magnética, los dos físicos llegaron a la conclusión de que todo elemento de la corriente crea a cierta distancia de él un campo magnético, *cuya inducción magnética ΔB es directamente proporcional a la longitud Δl de este elemento, a la magnitud de la corriente I, al seno del ángulo α entre el sentido de la corriente y el radio vector que une el punto del campo que nos interesa con el elemento dado de la corriente, y es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de este radio vector r:*

$$\Delta B = K \frac{I \Delta l \operatorname{sen} \alpha}{r^2},$$

donde K = coeficiente que depende de las propiedades magnéticas del medio ambiente y del sistema elegido de unidades.

En el sistema absoluto racionalizado de unidades MKSA

$$K = \frac{\mu \mu_0}{4\pi},$$

donde μ_0 = permeabilidad magnética del vacío en el sistema de unidades MKSA:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{henrios}}{\text{m}};$$

henrio (H) = unidad de inductancia; 1 H = 1 ohmio·seg.

μ = permeabilidad magnética relativa, coeficiente adimensional que indica en cuantas veces la permeabilidad magnética del material dado es mayor que la del vacío.

La dimensión de la inducción magnética se puede hallar por la fórmula:

$$[\Delta B] = \left[\frac{\mu \mu_0 I \Delta l \operatorname{sen} \alpha}{4\pi r^2} \right] = \frac{\text{ohmio·seg}}{\text{m}} \cdot \frac{\text{A·m}}{\text{m}^2} = \frac{\text{V·seg}}{\text{m}^2},$$

voltio-segundo se llama también weber (Wb)

$$[B] = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}.$$

En la práctica se usa una unidad más pequeña de inducción magnética, *g a u s s* (Gs)

$$1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 10^4 \text{ Gs}.$$

La ley de Biot-Savart permite calcular la inducción magnética de un conductor rectilíneo de longitud infinita

$$B = \mu \mu_0 \frac{1}{2\pi a},$$

donde a = distancia desde el conductor hasta el punto donde se determina la inducción magnética.

La relación de la inducción magnética al producto de las permeabilidades magnéticas $\mu \cdot \mu_0$ se llama *intensidad del campo magnético* y se designa con la letra H

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0},$$

o bien,

$$B = H\mu\mu_0.$$

La última igualdad relaciona dos unidades magnéticas: la inducción y la intensidad del campo magnético.

Hallaremos dimensión de H:

$$[H] = \left[\frac{B}{\mu\mu_0}\right] = \frac{\text{V}\cdot\text{seg}\cdot\text{m}}{\text{m}^2\cdot\text{ohmio}\cdot\text{seg}} = \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

A veces se utiliza otra unidad de intensidad: el oersted (Oe):

$$1 \text{ Oe} = 79{,}6 \text{ A/m} \approx 80 \text{ A/m} = 0{,}8 \text{ A/cm}.$$

La intensidad del campo magnético H, así como la inducción magnética B son magnitudes vectoriales.

La línea para cada punto de la cual la tangente coincide con la dirección del vector de la inducción magnética se llama *línea de inducción magnética o línea magnética de inducción.*

El producto de la inducción magnética por la magnitud de la superficie perpendicular al sentido del campo (al vector de la inducción magnética), se llama *flujo del vector de la inducción magnética*, o simplemente *flujo magnético* y se designa con la letra Φ

$$\Phi = BS.$$

La dimensión del flujo magnético es:

$$\Phi = [BS] = \frac{\text{V}\cdot\text{seg}}{\text{m}^2}\,\text{m}^2 = \text{V}\cdot\text{seg} \text{ o weber (Wb)},$$

es decir, el flujo magnético se mide en voltios-segundo o webers.

Una unidad más pequeña del flujo magnético es el maxwell (Mx)

$$1\text{Wb} = 10^8\text{Mx}$$
$$1\text{Mx} = 1\text{ Gs}\cdot 1\text{ cm}^2.$$

§ 58. Conductor circular con corriente

Tomemos un conductor en forma de espira y dejemos pasar por él una corriente eléctrica (fig. 84). En el dibujo se ve que las líneas magnéticas se cierran, como antes, alrededor del conductor de corriente y tienen la forma circular. Por un lado, las líneas magnéticas entran en el plano del conductor circular, por el otro, salen. El campo magnético de la corriente circular recuerda el campo de un imán muy corto, cuyo eje coincide con la perpendicular hacia el centro del plano del circuito.

El sentido del campo de la corriente circular se puede determinar haciendo uso de la «regla del sacacorchos».

El sacacorchos es necesario colocarlo según el eje de la corriente circular, perpendicularmente a su plano. Si ahora hacemos girar el mango del sacacorchos en sentido de la corriente en el circuito, el movimiento de traslación del sacacorchos indicará el sentido del

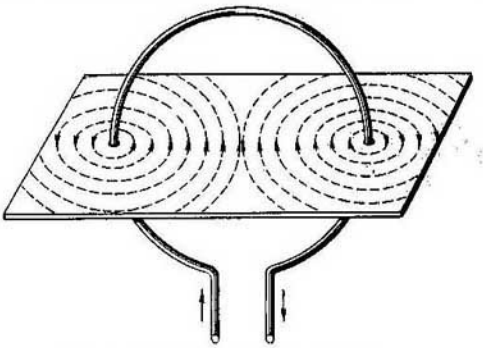


Fig. 84. Conductor circular con corriente

campo magnético. La intensidad del campo magnético en el centro del conductor circular con corriente se determina por la fórmula:

$$H = \frac{I}{2r};$$

pasando a la inducción magnética, tenemos:

$$B = \frac{\mu\mu_0 \cdot I}{2r} \text{ o } B = \frac{\mu\mu_0 I}{D},$$

donde r = radio de la espira;
D = diámetro de la espira.

§ 59. Solenoide. Electroimán

Un conductor enrollado en forma de una espiral por el cual pasa la corriente eléctrica se llama solenoide (fig. 85, *a*).

Si nos imaginamos que las espiras del solenoide están cortadas transversalmente, designamos el sentido de la corriente en ellas, como ha sido indicado anteriormente, y determinamos el sentido de las líneas magnéticas de inducción de acuerdo con la «regla del sacacorchos», el campo magnético de todo el solenoide tendrá la forma que está indicada en la fig. 85,*b*.

En el eje de un solenoide de longitud infinita, donde en cada unidad de longitud están enrolladas n_0 espiras, la intensidad del campo se determina por la fórmula:

$$H = In_0.$$

En el lugar donde las líneas magnéticas entran en el solenoide se forma el polo sur, donde ellas salen, el polo norte.

Para determinar los polos del solenoide se emplea la «regla del sacacorchos», usándola del modo siguiente: si colocamos el sacacorchos a lo largo del eje del solenoide y lo hacemos girar en el sentido

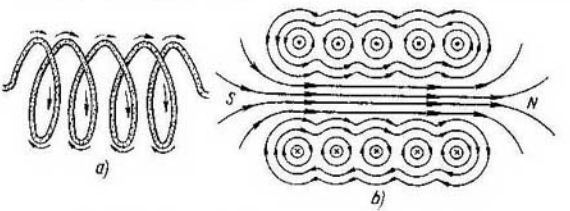


Fig. 85. Solenoide (*a*) y su campo magnético (*b*)

de la corriente eléctrica en las espiras del solenoide, el movimiento de traslación del sacacorchos indicará el sentido del campo magnético (fig. 86).

El solenoide, en cuyo interior se encuentra un núcleo de acero (hierro), se llama electroimán (fig. 87). El campo magnético del electroimán es más potente que el solenoide, ya que el pedazo de acero colocado en el solenoide se magnetiza y el campo magnético



Fig. 86. Determinación de los polos de un solenoide

resultante se intensifica. Los polos del electroimán se determinan del mismo modo que los del solenoide, según la «regla del sacacorchos».

En la técnica se utilizan ampliamente los electroimanes: sirven para crear el campo magnético en generadores y motores eléctricos, instrumentos de medición y aparatos eléctricos, etc.

En las potentes instalaciones para desconectar un sector averiado del circuito, en vez de fusibles, se emplean interruptores automá-

ticos de aire y de aceite. Para poner en funcionamiento las bobinas de interrupción de los interruptores automáticos se emplean diversos relés. Los instrumentos o aparatos automáticos que reaccionan a las variaciones de la corriente, tensión, potencia, frecuencia, etc., se denominan r e l é s.

De la gran cantidad de relés, diferentes por su aplicación, principio de funcionamiento y estructura, estudiaremos brevemente

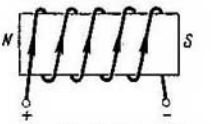


Fig. 87. Electroimán

la estructura de los relés electromagnéticos. En la fig. 88 se muestran las estructuras de estos relés. El funcionamiento del relé se basa en la acción mutua entre el campo magnético, creado por la bobina fija por la cual fluye corriente eléctrica y el inducido de acero móvil. Al cambiar las condiciones de trabajo en el circuito de la corriente principal, la bobina del relé se excita, el flujo magnético del núcleo

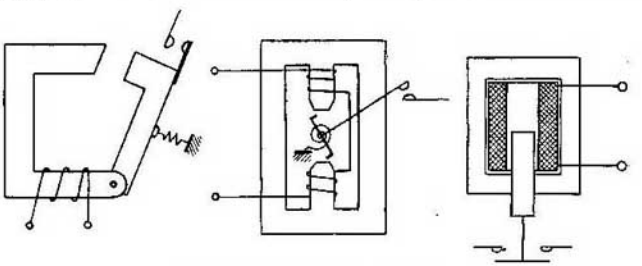


Fig. 88. Relé electromagnético

atrae (hace girar) el inducido, el cual cierra los contactos en el circuito que desconecta la bobina del accionamiento de los interruptores de aceite y de aire o de los relés auxiliares.

Los relés tienen gran aplicación también en los sistemas automáticos y en la telemecánica.

El flujo magnético del solenoide (o del electroimán) se incrementa con el aumento del número de espiras y de corriente en éste. La fuerza de magnetización depende del producto de la corriente por el número de espiras (número de amperios-vuelta).

Si, por ejemplo, tomamos un solenoide, por cuyo devanado fluye una corriente de 5 A y con número de espiras igual a 150, el número

de amperios-vuelta será de $5 \cdot 150 = 750$. El mismo flujo magnético se obtiene, si tomamos 1.500 espiras y dejamos pasar por ellas la corriente de 0,5 A, ya que $0{,}5 \cdot 1500 = 750$ amperios-vuelta.

El flujo magnético del solenoide se puede aumentar del modo siguiente: 1) colocando dentro del solenoide un núcleo de acero, convirtiéndolo en un electroimán; 2) aumentando la sección del núcleo de acero del electroimán (el aumento de la sección lleva al crecimiento del flujo magnético, permaneciendo iguales la corriente e intensidad del campo magnético y la inducción magnética); 3) disminuyendo el entrehierro del electroimán (al disminuir la distancia que deben recorrer las líneas magnéticas a través del aire se reduce la resistencia magnética).

§ 60. Ley de la corriente total

Supongamos que una línea cerrada l atraviesa un conductor con corriente (fig. 89), es decir, se unen uno a otro como dos eslabones de una cadena. Alrededor del conductor surge un campo magnético. Construyamos el vector de intensidad H, creada por la corriente en el punto A situado en la línea l. Si la línea abarca varios

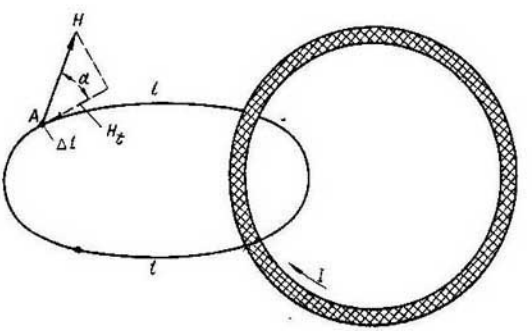


Fig. 89. Ley de la corriente total

conductores con corriente, para cada corriente se construyen vectores de intensidad en el punto dado de la línea. Sumando geométricamente los vectores de intensidad, hallamos el vector resultante de intensidad del campo magnético.

El vector resultante de la intesidad H forma en caso general con el elemento de longitud Δl un ángulo α. Por eso la componente longitudinal o tangencial H_t, de la intensidad resultante H será:

$$H_t = H \cos \alpha.$$

Si dividimos la línea cerrada en n elementos de longitud y sumamos los productos de las longitudes de todos los elementos por las componentes tangenciales de la intensidad resultante de los mismos, obtendremos la siguiente suma:

$$H_1\Delta l_1 \cos\alpha_1 + H_2\Delta l_2 \cos\alpha_2 + \ldots + H_n\Delta l_n \cos\alpha_n.$$

Esta suma puede ser representada también así:

$$\sum_{k=1}^{k=n} H_k\Delta l_k \cos\alpha_k,$$

donde el signo $\sum_{k=1}^{k=n}$ significa la suma desde $k = 1$ hasta $k = n$.

En la electrotecnia teórica se demuestra que la suma indicada es igual a la suma algebraica de las corrientes concatenadas con el circuito de adición, del mismo modo que se acoplan entre sí dos eslabones vecinos de una cadena.

Por tanto, se puede anotar

$$\Sigma H_k\Delta l_k \cos\alpha_k = \Sigma I.$$

Esta expresión se llama l e y d e l a c o r r i e n t e t o t a l. Cuando el circuito es traspasado reiteradamente por la misma corriente, como ocurre, por ejemplo, cuando hay un devanado con un número w de espiras, la corriente total será:

$$\Sigma I = wI.$$

Si el circuito cerrado de adición coincide con la línea magnética, el vector de intensidad en cualquier punto del circuito estará dirigido por la tangente al elemento de longitud Δl.

En este caso

$$H_{tk} = H_k;\ \alpha_k = 0;\quad \cos\alpha_k = 1,$$

y la ley de la corriente total adquiere la forma:

$$\sum_{k=1}^{k=n} H_k\Delta l_k = \Sigma I.$$

Si el valor de la intensidad para todos los puntos del circuito es igual, y la suma Δl para el circuito es igual a l, la ley de la corriente total se expresará del modo siguiente:

$$Hl = \Sigma I,$$

La ley de la corriente total es la ley fundamental para cálculo de los circuitos magnéticos y da la posibilidad de determinar fácilmente en algunos casos la intensidad del campo.

Por ejemplo, aplicando la ley de la corriente total para determinar la intensidad a una distancia a de un conductor rectilíneo con

corriente, tenemos:

$$\Sigma I = I,$$

$$l = 2\pi a.$$

Por eso

$$H 2\pi a = I,$$

de donde

$$H = \frac{I}{2\pi a} \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

La misma fórmula la hemos obtenido de la ley de Biot-Savart.

Para determinar la intensidad del campo en el interior de la bobina enrollada sobre un anillo (fig. 90), apliquemos de nuevo la

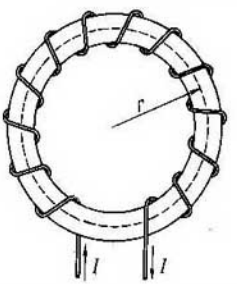


Fig. 90. Para la determinación de la intensidad del campo de una bobina arrollada sobre un anillo

ley de la corriente total. Ahí el circuito es la circunferencia con el radio r. El circuito lo traspasan w conductores con corrientes de un mismo sentido:

$$H 2\pi r = Iw.$$

Designando la longitud de la línea media del anillo con $l = 2\pi r$ obtendremos:

$$Hl = Iw,$$

de donde

$$H = \frac{Iw}{l} \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

De este modo, la intensidad del campo de la bobina es proporcional al producto de la cantidad de amperios por el número de espiras o la cantidad de amperios-vuelta. El producto Iw se llama **fuerza magnetizante** (FM) y se designa con la letra

F. Puesto que w es un número adimensional, la fuerza magnetizante se mide en amperios.

La inducción magnética en el interior de la bobina será:

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{Iw}{l} \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}.$$

Si la superficie de la sección transversal del anillo a lo largo de toda la longitud es la misma e igual a S, sabiendo la inducción magnética B, se puede determinar el flujo magnético Φ:

$$\Phi = BS = \mu\mu_0 HS = \mu\mu_0 \frac{IwS}{l} \text{ Wb}.$$

Esta fórmula puede ser representada en otra forma:

$$\Phi = \frac{wI}{\frac{l}{\mu\mu_0 S}}.$$

Por su estructura esta fórmula recuerda la de Ohm. Anteriormente se ha indicado que el producto $I \cdot w$ se llama fuerza magnetizante. La expresión $\left(\frac{l}{\mu\mu_0 S}\right)$, que está en el denominador se llama r e l u c t a n c i a y se designa con la letra R_m:

$$R_m = \frac{l}{\mu\mu_0 S}.$$

De la fórmula se ve que la reluctancia es directamente proporcional al camino recorrido e inversamente proporcional a la sección transversal del material por el cual pasa el flujo magnético.

De este modo, el flujo magnético Φ es proporcional a la fuerza magnetizante F e inversamente proporcional a la reluctancia R_m:

$$\Phi = \frac{F}{R_m}.$$

§ 61. Cuerpos ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos

Según el carácter de las propiedades magnéticas, las substancias se pueden dividir en tres grupos:

1) las ferromagnéticas que son las atraídas fuertemente por el imán. A éstas pertenecen: el hierro, acero, hierro fundido, níquel, cobalto, gadolinio y algunas aleaciones.

La permeabilidad magnética relativa de estas substancias es desde varias centenas hasta varias decenas de miles. Por ejemplo, para cobalto, 150; níquel, 300; hierro, hasta 5.000; permalloy (aleación de acero y níquel), hasta 100.000;

2) las paramagnéticas que son las atraídas débilmente por el imán. A éstas pertenecen: el aluminio, magnesio, estaño, platino, manganeso, oxígeno, etc. La permeabilidad magnética relativa de

estas substancias es un poco mayor que la unidad. Por ejemplo, para el aire, $\mu = 1{,}0000031$;

3) las diamagnéticas que son las repelidas débilmente por el imán. A éstas pertenecen: el zinc, mercurio, plomo, azufre, cobre, cloro, plata, agua y otras. La permeabilidad magnética relativa de estas substancias es un poco menor que la unidad. Por ejemplo, para el cobre, $\mu = 0{,}999995$.

§ 62. Cuerpos ferromagnéticos en un campo magnético

La función entre B y H, en los materiales ferromagnéticos, se expresa, en general, gráficamente por medio del diagrama llamado curva de magnetización. Para trazar la curva, sobre el eje horizontal

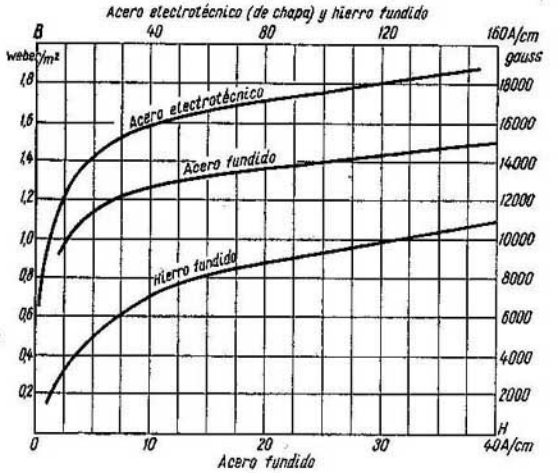


Fig. 91. Curvas de magnetización del acero electrotécnico, fundido y de hierro fundido

se marca la intensidad del campo magnético H, en $\frac{A}{m}$, $\frac{A}{cm}$ o Oe, y en el eje vertical, la magnitud de inducción magnética B, en $\frac{Wb}{m^2}$, $\frac{Wb}{cm^2}$ o en gauss. En la fig. 91 están dadas las curvas de magnetización del acero electrotécnico, acero y hierro fundido. Las magnitudes de intensidad del campo magnético para el acero se dan en la horizontal inferior, para el acero electrotécnico y el hierro fundido, en la horizontal superior. Al analizar la curva de magneti-

zación se ve que al aumentar la intensidad H, la inducción magnética B primero crece rápidamente, luego, en el lugar de la curvatura, la velocidad de crecimiento B disminuye y, al final, la curvatura aumenta lentamente, pasando a una línea recta. El último sector de la curva caracteriza el estado de saturación magnética del material. De la curva de magnetización se ve que la relación $\frac{B}{\mu_0 H} = \mu$ no es una magnitud constante, sino que cambia al variar B y H.

La permeabilidad magnética de las substancias ferromagnéticas depende de la magnitud de inducción magnética, composición química del metal, su previo tratamiento térmico y mecánico y de la temperatura del metal. Además, la permeabilidad magnética de estos cuerpos depende de su forma y dimensiones exteriores.

Las curvas de magnetización se obtienen de modo empírico para cada material y cada clase del mismo por separado.

Vamos a reducir la corriente en las espiras de la bobina. La intensidad del campo, y junto con ésta, la inducción magnética, disminuirán. Tan pronto como la corriente en el devanado de la bobina sea igual a cero, la intensidad del campo magnético será también igual a cero. Sin embargo, el núcleo de acero conservará cierta inducción magnética. La inducción que queda en el cuerpo ferromagnético cuando la intensidad del campo es nula, se llama inducción remanente o magnetismo remanente.

El hierro puro, acero dulce, aleaciones de hierro con silicio (acero electrotécnico), aleaciones de hierro con níquel (permalloy) disponen de cierto magnetismo remanente. Estos metales y aleaciones se magnetizan fácilmente y también se desmagnetizan con facilidad. Se emplean para fabricar núcleos de electroimanes, transformadores, terminales polares, inducidos de generadores, etc.

Clases especiales de aceros duros, como al volframio, al cromo, al cobalto y al níquel-aluminio, poseen el máximo magnetismo remanente. Estos aceros se utilizan para fabricar imanes permanentes.

§ 63. Histéresis *)

Veamos el proceso de magnetización variable de un material ferromagnético. Con este fin, enrollemos sobre un núcleo de acero un devanado por el cual haremos pasar la corriente continua. Supongamos que el núcleo del electroimán no ha sido magnetizado antes. Aumentando a partir de cero la corriente eléctrica I que pasa por las espiras del devanado, aumentaremos de este modo la fuerza magnetizante y la intensidad del campo H. La magnitud de la inducción magnética B en el núcleo también crecerá. La curva de magnetización Oa en la fig. 92 tiene un sector rectilíneo y luego, a consecuen-

* La palabra «histéresis» significa retardo, **retraso.**

cia de la saturación, la curva se eleva lentamente, aproximándose a una horizontal. Si ahora, después de alcanzar el punto a, disminuimos H, se irá reduciendo también B. Sin embargo, la reducción de B al disminuir H, es decir, durante la desmagnetización, se efectuará con retardo respecto a la disminución de H. La magnitud de la inducción remanente cuando $H = 0$ se caracteriza por el segmento Ob.

Para que la inducción magnética en el núcleo se haga igual a cero, es necesario magnetizar el material en sentido contrario, es decir,

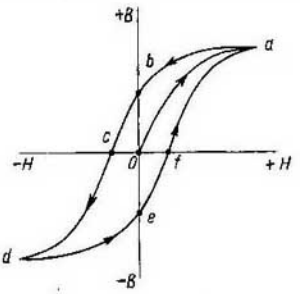


Fig. 92. Ciclo de histéresis

remagnetizarlo. Con este fin, la dirección de la corriente en el devanado se invierte. La dirección de las líneas magnéticas y de la intensidad del campo también cambia. Cuando la intensidad del campo $H = Oc$, la inducción en el núcleo es nula y el material del núcleo está desmagnetizado por completo. El valor de la intensidad del campo $H = Oc$, cuando $B = 0$, resulta ser una característica determinada del material y se llama fuerza de retardo (coercitiva).

Repitiendo el proceso de remagnetización, obtenemos una curva cerrada a b c d e f a que se llama «lazo de histéresis». Mediante este experimento es fácil convencerse de que la magnetización y desmagnetización del núcleo (aparición y desaparición de los polos, de la inducción magnética o del flujo magnético) quedan retardadas con respecto al momento de aparición y desaparición de la fuerza magnetizante y desmagnetizante (de la corriente en el devanado del electroimán). El fenómeno de histéresis se puede caracterizar, con otras palabras, como retardo de las variaciones de la inducción magnética dependientes de los cambios de la intensidad del campo. La remagnetización del material está ligada con la disipación de cierta cantidad de energía que se desprende en forma de calor, elevando la temperatura del material.

La histéresis se manifiesta particularmente si el material del núcleo dispone de alto magnetismo remanente (por ejemplo, acero

duro). El fenómeno de histéresis en la mayoría de los casos es nocivo. Va acompañado de un calentamiento del núcleo, consumo excesivo de potencia del generador de tensión y zumbido del núcleo, a consecuencia del cambio de la polaridad y de los cambios de posición de las partículas elementales del material del núcleo.

El primer estudio detallado de los procesos de magnetización del acero fue realizado por Alexandr Stoletov (1839—1896) en 1872 y publicado en la obra «Acerca de la función de magnetización de hierro dulce».

Además, Stoletov investigó y explicó la naturaleza del efecto fotoeléctrico externo y construyó el primer fotoelemento.

§ 64. Circuitos magnéticos y su cálculo

Se llama circuito magnético o conductor magnético al camino por el cual se cierra un flujo magnético. Este camino sólo puede pasar por el aire.

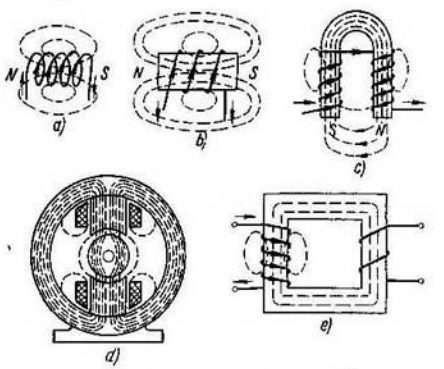


Fig. 93. Ejemplos de campos magnéticos

En la fig. 93,*a*, se muestra un solenoide. El circuito magnético pasa aquí por el aire. La reluctancia del aire es muy grande, por eso, aunque la fuerza magnetizante sea grande, el flujo magnético es muy pequeño.

Para aumentar el flujo se incluyen materiales ferromagnéticos en el circuito magnético (generalmente acero colado o electrotécnico) que tienen menor reluctancia.

En la fig. 93,*b* está representado un electroimán recto con núcleo abierto. Las líneas magnéticas recorren la mayor parte de su camino por el aire, la menor, por el núcleo. Los polos del electroimán se determinan mediante la «regla del sacacorchos».

El electroimán en forma de herradura representado en la fig. 93,*c*, es un circuito magnético con las mejores condiciones para el paso del flujo magnético. Debido a semejante estructura del electroimán, la mayor parte del camino recorrido por el flujo pasa por el acero y, la menor, del polo N al polo S, por el aire.

En la fig. 93,*d*, está representado el esquema de un circuito magnético que se aplica en la construcción de máquinas y aparatos eléctricos. Entre los polos del electroimán se coloca un inducido de acero. La mayor parte de su camino, las líneas magnéticas pasan por el acero, y solamente una parte muy reducida (de partes de milímetro hasta 2 ó 3 mm) pasa por dos espacios aéreos.

Los transformadores tienen un núcleo cerrado de acero (fig. 93,*e*). Los núcleos de los transformadores están compuestos de varias piezas. Al montar los núcleos, se toman las debidas precauciones para que los huelgos entre las piezas componentes sean prácticamente nulas.

Hasta ahora no hemos dicho nada de que el flujo magnético creado por la fuerza magnetizante no se cierra en su totalidad por el trayecto que le es predestinado. Además del flujo magnético activo, existe el de dispersión que se cierra fuera del lugar donde se utiliza el flujo magnético activo. En las figs. 93, *b*, *c*, *d*, *e* se muestran los flujos de dispersión.

De este modo, el flujo magnético total, que debe crear el devanado de excitación del electroimán, es igual a la suma del flujo activo y del de dispersión.

Al parecer, se podría efectuar el cálculo del circuito magnético por la fórmula:

$$\Phi = \frac{Iw}{\frac{l_{med}}{\mu\mu_0 S}}$$

Pero, si recordamos que la permeabilidad magnética relativa μ, para los cuerpos ferromagnéticos, no es constante y depende de muchas circunstancias, es evidente que se puede aplicar esta fórmula cuando los circuitos magnéticos comprenden cuerpos solamente no magnéticos (incluyendo el aire), para los cuales μ es una magnitud ya conocida.

Prácticamente, para calcular los circuitos magnéticos se prefiere el método gráfico de solución.

El cálculo del circuito magnético se efectúa en el orden siguiente: se establece la magnitud necesaria del flujo magnético, se divide el circuito magnético en sectores que tienen iguales secciones transversales y material homogéneo, y para cada sector se determina la magnitud de la inducción magnética por la fórmula:

$$B = \frac{\Phi}{S}.$$

Después, por las curvas de magnetización para el material dado se halla la magnitud H para cada valor de la inducción magnética. Si en el circuito magnético hay holguras aéreas, la dependencia entre B_0 y H_0 se determina por la fórmula

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0 10^7}{4\pi} = 80 \cdot 10^4 B_0 \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

Aquí B_0 está expresado en $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$, μ_0 en $\frac{\text{henrio}}{\text{m}}$, H_0 en $\frac{\text{A}}{\text{cm}}$.

Si la inducción está expresada en gauss y la intensidad en $\frac{\text{A}}{\text{cm}}$, la relación entre B_0 y H será:

$$H_0 = 0{,}8 B_0.$$

Después de determinar el valor H para cada sector, hallamos la magnitud de la fuerza magnetizante de acuerdo con la ley de la corriente total, por la fórmula:

$$Iw = H_0 l_0 + H_1 l_1 + H_2 l_2 + \ldots + H_n l_n.$$

Ejemplo: Hallar la fuerza magnetizante del devanado del electroimán expuesto en la fig. 94. Las dimensiones se dan en milímetros. El núcleo es de

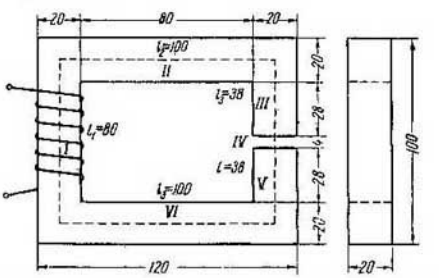


Fig. 94. Para el ejemplo de cálculo de un circuito magnético

acero electrotécnico. Es necesario crear en el núcleo un flujo magnético de 60.000 Mx. No tomamos en consideración la dispersión magnética.

Trazamos la línea central a lo largo de todo el circuito magnético. Dividimos el circuito en cinco sectores y determinamos la longitud de cada sector.

Ya que el flujo magnético en todos los sectores es igual y el área de la sección transversal de todos los sectores del circuito magnético es también igual (2 × 2 cm), la inducción magnética en todas las partes será también igual.

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{60.000 \text{Mx}}{4 \text{ cm}^2} 15.000 = \text{Gs}.$$

Según la curva de magnetización para el acero electrotécnico (fig. 91) hallamos que para la inducción de 15.000 Gs, la intensidad del campo magnético es $H = 30$ A/cm.

Para la holgura aérea tenemos:

$$H_0 = 0{,}8 \cdot 15.000 = 12.000 \frac{\text{A}}{\text{cm}}.$$

Multiplicando los valores de la intensidad por las longitudes de los sectores correspondientes, obtenemos los productos *Hl* para estos sectores.

Los resultados del cálculo los anotamos en la tabla 14.

Tabla 14

N° de sectores	Material	*B*	*l*	*H*	*Hl*
		Gs	cm	A/cm	A
I	Acero electrotécnico	15.000	8	30	240
II y VI	Idem	15.000	10 × 2	30	600
III y V	Idem	15.000	3,8 × 2	30	228
IV	Aire	15.000	0,4	12.000	4 800

Es necesario subrayar, que si en los sectores de acero electrotécnico I, II, III, V y VI con longitud total de 35,6 cm (8 + 20 + 7,6 cm) se necesita una fuerza magnetizante de 1.068 A (240 + 600 + 228 A) para hacer pasar el flujo magnético, por la holgura aérea de 4 mm de longitud (89 veces menor que la longitud del camino recorrido en el acero) es necesaria una fuerza magnetizante de 4.800 A. De aquí que sea evidente la necesidad de crear circuitos magnéticos con holguras aéreas mínimas.

§ 65. Imanes permanentes

Después de haber sido descubierto el campo magnético alrededor de un conductor de corriente eléctrica, ha sido observada la identidad de la acción magnética de las corrientes y de los imanes permanentes. Más tarde, la ciencia ha llegado a la conclusión de que la corriente eléctrica es la causa de todo campo magnético. Basándose en esta conclusión, la ciencia abandonó la antigua concepción sobre la existencia en la naturaleza de masas magnéticas positivas y negativas concentradas en los polos norte y sur de los imanes.

El campo magnético de un cuerpo ferromagnético imantado (es decir, de un imán permanente), de acuerdo con las concepciones científicas modernas, se crea principalmente con la rotación propia de los electrones alrededor de los ejes, que pasan a través de éstos, lo que es equivalente a ciertas corrientes elementales cerradas.

En un cuerpo no magnetizado aislados grupos de corrientes elementales y sus campos magnéticos están dispuestos irregularmente. Por eso, en el espacio exterior no se observa campo magnético.

Bajo la influencia del campo magnético exterior las corrientes elementales, provocadas por la rotación propia de los electrones, se disponen más o menos paralelamente una a la otra y crean un campo magnético resultante.

Un cuerpo ferromagnético que dispone de una magnetización remanente se denomina **imán permanente**.

Si cubrimos un imán permanente con un cartón o vidrio y ponemos encima limaduras de hierro, éstas se orientarán formando líneas curvas, yendo de un polo al otro (fig. 95). Se considera convencionalmente que las líneas magnéticas de inducción salen del polo norte del imán y entran al polo sur (fig. 95).

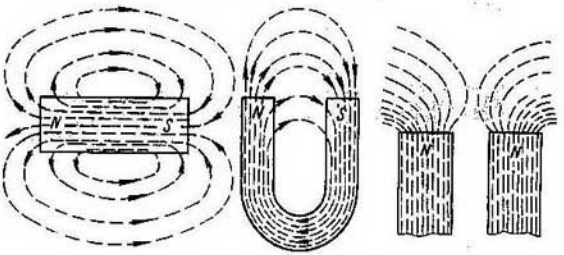


Fig. 95. Campo magnético de los imanes permanentes

Las líneas magnéticas de inducción poseen las siguientes propiedades:

1) forman circuitos cerrados, es decir, no se interrumpen en ninguna parte;

2) en el interior del imán las líneas magnéticas de inducción van del polo sur al polo norte;

3) tienden a reducirse por su longitud, es decir, disponen de la propiedad de tensión longitudinal;

4) tienden a actuar una sobre otra en sentido perpendicular a su longitud, es decir, disponen de la propiedad de expansión lateral;

5) las líneas magnéticas de inducción nunca se intersecan.

§ 66. Conductor con corriente en un campo magnético

Si colocamos un conductor con corriente en un campo magnético (fig. 96,*a*) veremos que a consecuencia de la suma de los campos magnéticos del imán y del conductor, el campo magnético resultante se intensificará en un lado del conductor y se debilitará en el otro. Como resultado de la acción de dos campos magnéticos, las líneas magnéticas se torcerán y, tendiendo a reducirse, empujarán el conductor hacia abajo (fig. 96,*b*).

La dirección de la fuerza que actúa en un campo magnético sobre el conductor con corriente eléctrica se puede determinar por la «regla de la mano izquierda». *Si colocamos la mano izquierda en un campo magnético de tal modo que las líneas magnéticas que salen del polo*

norte atraviesen la palma, y los cuatro dedos extendidos coincidan con la dirección de la corriente en el conductor, el dedo pulgar en abducción indicará la dirección de la fuerza (fig. 97).

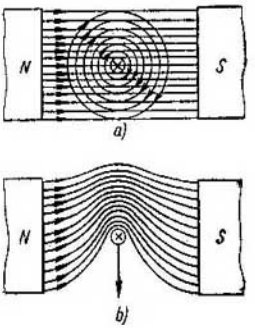


Fig. 96. Interacción entre un conductor con corriente y un campo magnético

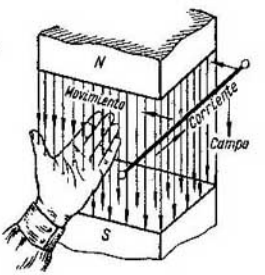


Fig. 97. Determinación de la dirección de la fuerza que actúa sobre un conductor según la «regla de la mano izquierda»

De la fig. 98 se ve que la dirección de la fuerza que actúa sobre el conductor se puede variar, bien invirtiendo los polos y cambiando de este modo la dirección del campo magnético (fig. 98, *a* y *b*, así como *c* y *d*), bien invirtiendo la dirección de la corriente en el conductor (figs. *a* y *c*, así como *b* y *d*).

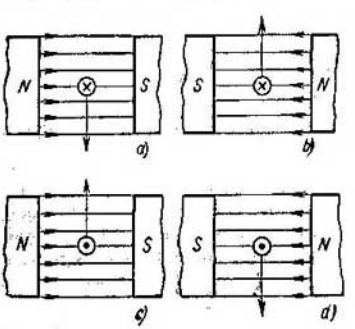


Fig. 98. Relación entre la dirección de la fuerza que actúa sobre un conductor con corriente en el campo magnético y la dirección del campo y de la corriente en el conductor

Pero si cambiamos simultáneamente, tanto los polos, como la dirección de la corriente en el conductor, el sentido de la fuerza que actúa sobre el conductor queda invariable (fig. 98, *a* y *d*, así como *b* y *c*).

La fuerza ΔF que actúa sobre un elemento de longitud Δl del conductor depende: de la magnitud de la inducción magnética B, de la magnitud de la corriente en el conductor I, del elemento de longitud Δl del conductor y del seno del ángulo α entre la dirección del elemento de logitud Δl del conductor y la del campo magnético. Esta relación puede ser expresada por la fórmula:

$$\Delta F = BI\Delta l \operatorname{sen}\alpha.$$

Para un conductor rectilíneo de longitud finita, colocado perpendicularmente al sentido de un campo magnético uniforme, la fuerza que actúa sobre aquél será igual a:

$$F = BIl.$$

De la última fórmula determinamos el valor de la inducción magnética.

Puesto que el valor de la fuerza es:

$$[F] = \frac{\text{J}}{\text{m}} = \frac{\text{W}\cdot\text{seg}}{\text{m}} = \frac{\text{V}\cdot\text{A}\cdot\text{seg}}{\text{m}},$$

el valor de la inducción magnética será

$$[B] = \frac{[F]}{[I][l]} = \frac{\dfrac{\text{V}\cdot\text{A}\cdot\text{seg}}{\text{m}}}{\text{A}\cdot\text{m}} = \frac{\text{V}\cdot\text{seg}}{\text{m}^2},$$

es decir, el valor de la inducción es el mismo que hemos obtenido por la ley de Biot-Savart.

§ 67. Principio de acción de un motor eléctrico de corriente continua

Una máquina destinada a convertir la energía eléctrica en mecánica se llama motor eléctrico. El primer motor eléctrico fue construido en 1838 por el académico ruso Jacobi. Todo motor eléctrico funciona basándose en el principio de acción mutua entre un conductor con corriente y un campo magnético. En la fig. 99 se muestra el esquema de un motor eléctrico de corriente continua. El campo magnético es creado aquí por los polos *1* y *2* del electroimán.

Los conductores, por los cuales circula la corriente, están en las ranuras de un tambor de acero *3* (inducido o rotor).

Si dejamos pasar una corriente eléctrica por los conductores de la mitad superior del inducido «desde nosotros», y en la mitad inferior, «hacia nosotros», según la «regla de la mano izquierda» los conductores de la mitad superior del inducido serán empujados por

el campo magnético hacia la izquierda, y los conductores de la mitad inferior, hacia la derecha. Puesto que los conductores del inducido están ubicados en sus ranuras, al ser empujados por el campo magnético, harán girar el inducido.

En la figura se ve, que si el conductor con la corriente «desde nosotros» pasa abajo y se pone frente al polo sur del electroimán, aquél es empujado a la izquierda, lo que impedirá el giro del inducido. Lo mismo sucederá, si el conductor con la corriente «hacia

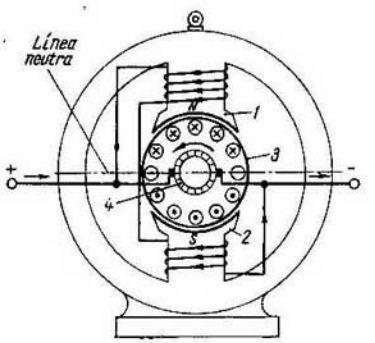


Fig. 99. Esquema de un motor eléctrico

nosotros» se traslada desde la mitad inferior del inducido hacia arriba y se pone frente al polo norte del electroimán. Por eso es necesario que, inmediatamente después de que el conductor en su movimiento pase la línea neutra, la dirección de la corriente eléctrica en éste cambie. En los motores eléctricos de corriente continua esto se consigue mediante un dispositivo especial: el colector *4* al cual se conectan los terminales de los conductores del inducido.

§ 68. Interacción de conductores con corriente

Si dos conductores con corrientes de igual dirección están cerca uno del otro, las líneas magnéticas que los envuelven, disponiendo de la propiedad de tensión longitudinal y tendiendo a reducirse harán que los conductores se atraigan (fig. 100, *a*).

Las líneas magnéticas de dos conductores con corrientes contrarias en el espacio entre éstos tienen el mismo sentido. Las líneas magnéticas de la misma dirección tienen la propiedad de expansión lateral. Por eso los conductores con corrientes de direcciones contrarias se repelen (fig. 100, *b*).

Analicemos la interacción de dos conductores paralelos con corrientes, situados a una distancia a uno del otro. Supongamos que la longitud de los conductores es igual a l.

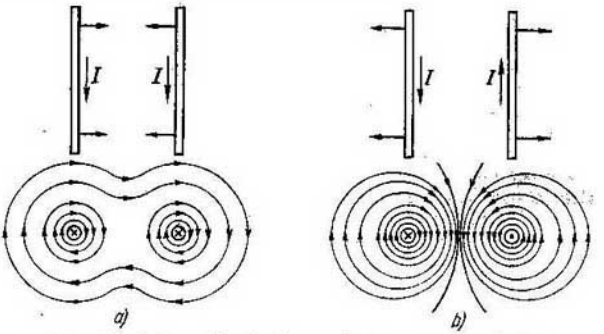


Fig. 100. Interacción de dos conductores con corrientes:
a — que pasan en el mismo sentido, b — que pasan en sentido contrario

La inducción magnética creada por la corriente I_1, en la línea donde está situado el segundo conductor es igual a:

$$B_1 = \mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi a}.$$

Sobre el segundo conductor actuará la fuerza

$$F_2 = lI_2B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}.$$

La inducción magnética creada por la corriente I_2 en la línea donde está situado el segundo conductor es igual a:

$$B_2 = \mu\mu_0 \frac{I_2}{2\pi a},$$

y sobre el primer conductor actuará la fuerza

$$F_1 = B_2 l I_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a},$$

cuya magnitud es igual a la de la fuerza F_2.

§ 69. Materiales magnéticos y no magnéticos

En los circuitos magnéticos de distintas máquinas eléctricas, transformadores, instrumentos y aparatos electrotécnicos, radiotécnicos y de otras ramas de la técnica se encuentran diversos materiales magnéticos y no magnéticos.

Las propiedades de un material magnético se caracterizan por las magnitudes de la intensidad del campo magnético, flujo magnético, inducción magnética y permeabilidad magnética.

La dependencia entre la inducción magnética y la intensidad del campo magnético, expresada gráficamente, forma una curva que se llama **lazo de histéresis**. Aplicando esta curva se pueden obtener varios datos que caracterizan las propiedades magnéticas del material.

El campo magnético variable provoca el surgimiento de corrientes parásitas en los materiales magnéticos. Estas corrientes calientan los núcleos (conductores magnéticos), lo que conduce al consumo de cierta potencia.

Para caracterizar un material que actúa en un campo magnético variable, el valor de la suma de las potencias consumidas por histéresis y corrientes parásitas, siendo la frecuencia de 50 Hz, es referido a 1 kg de peso del material. Esta magnitud se llama **pérdidas específicas** y se expresa en W/kg.

La inducción de cualquier material magnético no debe superar cierto valor máximo en dependencia del tipo y la calidad del material dado. Los intentos de aumentar la inducción llevan al incremento de las pérdidas de energía en el material dado y a su calentamiento.

Los materiales magnéticos se dividen en dos grupos: magnéticamente blandos y magnéticamente duros.

Materiales magnéticamente blandos. Los materiales magnéticamente blandos deben llenar los siguientes requisitos:

1) disponer de gran permeabilidad magnética relativa μ que permite obtener una alta inducción magnética B con el mínimo número posible de amperios-vuelta;

2) tener pérdidas mínimas posibles por histéresis y corrientes parásitas;

3) poseer propiedades magnéticas estables.

Los materiales de este grupo se utilizan como conductores magnéticos de las máquinas eléctricas, núcleos de los transformadores, choques, electroimanes de los relés, instrumentos eléctricos de medición, etc. Veamos las características de algunos materiales magnéticamente blandos.

Hierro electrolítico se obtiene mediante la electrólisis del sulfato o cloruro de hierro con fusión ulterior en el vacío de los productos de la electrólisis. El hierro electrolítico en polvo se emplea para fabricar piezas magnéticas. Estas se producen a semejanza de la producción de objetos de cerámica o de materiales plásticos.

Hierro carbonilo se obtiene en forma de polvo como resultado de la desintegración térmica de la substancia que contiene hierro, carbono y oxígeno [$Fe(CO)_5$]. A 1.200°C el polvo de hierro carbonilo se sinteriza y se emplea para fabricar las mismas piezas

que se hacen de hierro electrolítico. El hierro carbonilo se distingue por su alta pureza y plasticidad; se emplea en la industria eléctrica de vacío, así como en la fabricación de instrumentos y aparatos de laboratorio.

Los dos tipos de hierro puro especial mencionados (hierro electrolítico y hierro carbonilo) contienen no más de un 0,05% de impurezas.

Acero electrotécnico en chapas, es el material más empleado en la construcción de máquinas eléctricas y transformadores. Al acero electrotécnico se añade silicio para elevar sus propiedades magnéticas y reducir las pérdidas por histéresis. Además, como resultado de la adición de silicio al acero, éste aumenta su resistividad, lo que conduce a la reducción de las pérdidas por corrientes parásitas. En dependencia de la marca de acero, el espesor de las chapas es de 0,3 a 0,5 mm. El acero electrotécnico, laminado en frío, con recocido posterior en atmósfera de hidrógeno, dispone en particular de altas propiedades magnéticas. Esto se explica, porque los cristales del metal se sitúan paralelamente a la dirección del laminado. Dicho acero se designa con las letras XBП (laminado en frío, de alta permeabilidad, texturado). Las chapas de acero tienen dimensiones de 1.000 × 700 a 2.000 × 1.000 mm.

Según la norma soviética, han sido adoptadas nuevas nomenclaturas en las marcas de acero electrotécnico, por ejemplo, *3*11, *3*21, *3*320, *3*370, *3*43. Aquí la sigla *3* significa acero electrotécnico; la primera cifra: 1, acero con poco contenido de silicio; 2, con contenido medio de silicio; 3, con contenido elevado de silicio y 4, con contenido alto de silicio. La segunda cifra indica las siguientes propiedades magnéticas y eléctricas garantizadas de los aceros: 1, 2, 3, pérdidas específicas al remagnetizar los aceros, a la frecuencia de 50 Hz e inducción magnética en campos potentes; 4, pérdidas específicas al remagnetizar los aceros a la frecuencia de 400 Hz e inducción magnética en campos medios; 5, 6, permeabilidad magnética en campos débiles ($H < 0{,}01$ A/cm); 7, 8, permeabilidad magnética en campos medios (H de 0,1 a 1 A/cm). La tercera cifra 0 indica que el acero es laminado en frío, texturado.

El permalloy es una aleación de hierro y níquel. La composición aproximada del permalloy es: 30—80% de níquel, 10—18% de hierro, el resto: cobre, molibdeno, manganeso, cromo. El permalloy se trabaja bien y se fabrica en forma de chapas. Dispone de muy alta permeabilidad magnética, en campos magnéticos débiles (hasta 200.000 henrios/cm). El permalloy se emplea para fabricar piezas destinadas a la comunicación telefónica y radio, núcleos para transformadores, bobinas de inducción, relés, piezas de instrumentos eléctricos de medición.

El alsifer es una aleación de aluminio, silicio y hierro. La composicion aproximada del alsifer es: 9,5% de silicio, 5,6% de aluminio, el resto, hierro. El alsifer es una aleación dura y frágil,

por eso, se trabaja con dificultad. Las ventajas del alsifer son: alta permeabilidad magnética en campos magnéticos débiles (hasta 110.000 henrios/cm), gran resistividad ($\rho = 0{,}81\Omega \cdot mm^2/m$), y ausencia de metales raros en su composición. Se utiliza para fabricar núcleos que funcionan en instalaciones de alta frecuencia.

El permendur es una aleación de hierro con cobalto y vanadio (50% de cobalto, 1,8% de vanadio, el resto, hierro). El permendur se produce en chapas, flejes y cintas. Se emplea para fabricar núcleos de electroimanes, altavoces, membranas telefónicas, osciló-grafos, etc.

Los dieléctricos magnéticos son materiales magnéticamente blandos triturados en granos (polvo), que se aíslan uno de otro mediante resinas u otros aglutinantes. Como polvos magnéticos se emplean el hierro electrolítico, hierro carbonilo, permalloy, alsifer, magnetita (mineral $FeO \cdot Fe_2O_3$). Los aglutinantes aislantes son: goma laca, resinas fenólicas de formaldehido, poliestireno, vidrio líquido y otros. El polvo de un material magnético se mezcla minuciosamente con un aglutinante aislante y de la masa obtenida se prensan núcleos de transformadores, choques, piezas de radioaparatos. La estructura granulada de los materiales magnetodieléctricos reporta pérdidas insignificantes por corrientes parásitas, durante el funcionamiento de éstos en campos magnéticos de corrientes de alta frecuencia.

Materiales magnéticamente duros. Los materiales magnéticamente duros se emplean para fabricar imanes permanentes. Estos materiales han de satisfacer los siguientes requisitos:

1) disponer de gran inducción remanente;
2) tener máxima energía magnética grande;
3) poseer propiedades magnéticas estables.

El material más barato para los imanes permanentes es el acero al carbono (0,4-1,7% de carbono, el resto, hierro). Los imanes fabricados de acero al carbono no presentan altas propiedades magnéticas y las pierden rápidamente al experimentar calentamiento, golpes y sacudidas.

Los aceros aleados disponen de mejores propiedades magnéticas y se emplean más a menudo para fabricar imanes permanentes que el acero al carbono. Entre éstos tenemos los aceros al cromo, al volframio, al cobalto y al cobalto-molibdeno.

Para fabricar imanes permanentes se han creado aleaciones a base de hierro-níquel-aluminio. Estas aleaciones se distinguen por su alta dureza y fragilidad, por eso pueden trabajarse solamente por pulido. Las aleaciones disponen de propiedades magnéticas extraordinariamente altas y de gran energía magnética en la unidad de volumen.

En la tabla 15 se citan los datos sobre la composición de algunos materiales magnéticamente duros para fabricar imanes permanentes.

Tabla 15

Composición química de los materiales magnéticamente duros

Denominación del material	Composición química, % en peso	Peso relativo a la unidad de energía magnética
Acero al carbono	0,45 de C, el resto, Fe	26,7
Acero al cromo	2-3 de Cr; 1 de C	17,2
Acero al volframio	5 de W; 1 de C	15,8
Acero al cobalto	5-30 de Co; 5-8 de Cr; 1,5-5 de W	5,1-12,6
Acero al cobalto-molibdeno	13-17 de Mo; 10-12 de Co	3,8
Alni	12,5 de Al; 25 de Ni; 5 de Cu	3,6
Alnici	14 de Al; 34 de Ni; 1 de Si	3,4
Alnico	10 de Al; 17 de Ni; 12 de Co; 6 de Cu	3,1
Magnico	24 de Co; 13 de Si; 8 de Al; 3 de Cu	1

Materiales no magnéticos. En muchos instrumentos y aparatos utilizados en la electrotecnia son necesarios materiales que no tengan propiedades magnéticas. Para ese fin son útiles los materiales plásticos o metales no ferrosos (aluminio, latón, bronce). Pero dichos materiales poseen pequeña resistencia mecánica, y algunos son deficitarios. Por lo tanto se sustituyen por acero no magnético y hierro fundido no magnético.

Composición aproximada del acero no magnético: 0,25-0,35% de carbono, 22-25% de níquel, 2-3% de cromo, el resto hierro. El acero no magnético se emplea para ensamblar y fijar los transformadores, choques, bobinas de inducción, etc.

La composición aproximada de hierro fundido no magnético: 2,6-3% de carbono, 2,5% de silicio, 5,6% de manganeso, 9-12% de níquel, el resto, hierro.

El hierro fundido no magnético se utiliza para fabricar tapas, fundas, casquillos, interruptores de aceite, manguitos de cables, fundas de transformadores de soldadura.

Problemas

1. Determinar la intensidad de un campo magnético que pasa por un conductor rectilíneo largo en el punto situado a 10 cm del conductor. La corriente que crea el campo magnético es de 100 A.

2. Determinar la intensidad del campo magnético creado por la corriente de 20 A, que pasa por un conductor circular de 5 cm de radio, en el punto situado en el centro de la espira.

3. Determinar el flujo magnético que pasa por una barra de níquel colocada en un campo magnético homogéneo de 500 A/m de intensidad. El área de la sección transversal de la barra es de 25 cm^2. La permeabilidad magnética relativa del níquel es de 300.

4. Un conductor rectilíneo de 40 cm de largo está colocado en un campo magnético uniforme bajo un ángulo de 30° con respecto a la dirección del campo magnético. Por el conductor pasa una corriente de 50 A. La inducción del campo es igual a 5.000 Gs. Determinar la fuerza de repulsión del conductor con respecto al campo magnético.

5. Determinar la fuerza con que se repelen dos conductores rectilíneos dispuestos paralelamente en el aire. La longitud de los conductores es de 2 m, la distancia entre ellos, 20 cm. Por los conductores pasa una corriente de 10 A.

Preguntas de control

1. ¿Qué experimento nos convence de que alrededor de un conductor con corriente se forma un campo magnético?
2. ¿Cuáles son las propiedades de las líneas magnéticas?
3. ¿Cómo determinar la dirección de las líneas magnéticas?
4. ¿Qué es un solenoide y cuál es su campo magnético?
5. ¿Cómo determinar los polos de un solenoide?
6. ¿Qué es un electroimán y cómo determinar sus polos?
7. ¿Qué es la histéresis?
8. ¿Cuáles suelen ser las formas de electroimanes?
9. ¿Cómo interactúan los conductores por los cuales fluye la corriente eléctrica?
10. ¿Qué fuerzas actúan sobre un conductor con corriente en un campo magnético?
11. ¿Cómo determinar la dirección de la fuerza que actúa sobre un conductor con corriente en un campo magnético?
12. ¿Cuál es el principio de trabajo de los motores eléctricos?
13. ¿Qué cuerpos se llaman ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos?

VI

INDUCCION ELECTROMAGNETICA

§ 70. Obtención de fuerza electromotriz inducida

Tomemos un imán permanente *1* (fig. 101,*a*) e introduzcámoslo poco a poco en la bobina *2* (solenoide). Veremos que la aguja del galvanómetro *3*, conectado al circuito, se desviará (por ejemplo, a la derecha). Esto indicará la aparición de una f.e.m. y corriente en el solenoide.

Si el movimiento del imán se interrumpe, la aguja del galvanómetro volverá a la posición cero (fig. 101,*b*). Esto demuestra que para la aparición de una f.e.m. inducida se necesitan no sólo un campo magnético y un conductor, sino que éstos se desplacen uno respecto al otro.

Al extraer de la bobina el imán permanente (fig. 101,*c*), se puede notar que la aguja del galvanómetro se desvía, pero en el sentido contrario (a la izquierda), lo que demuestra que la dirección de la f.e.m. inducida depende de la dirección del movimiento del campo magnético que atraviesa el conductor inmóvil, o de la dirección del movimiento del conductor que atraviesa el campo magnético.

En el experimento mencionado hemos visto que al introducir el imán permanente dentro de la bobina, la aguja del galvanómetro se ha desviado a la derecha, cuando el imán estaba con el polo norte hacia abajo (fig. 101,*a*). Si invertimos el imán y lo introducimos de nuevo en la bobina, la aguja del galvanómetro se desviará en dirección contraria, es decir, a la izquierda (fig. 101,*d*). Esto demuestra que el sentido de la f.e.m. inducida depende también de la dirección del campo magnético.

El fenómeno de surgimiento de la f.e.m. en un circuito que es atravesado por un campo magnético se llama **inducción electromagnética** y fue descubierto por el físico Michael Faraday en 1831.

Si al conductor cerrado *1* (fig. 102) sin corriente le acercamos o alejamos el conductor *2*, por el que pasa una corriente eléctrica, en el conductor *1* se inducirá una f.e.m. Sucederá lo mismo, si los dos conductores *1* y *2* están fijos, pero se cambia la polaridad de

la corriente o se abre o se cierra el circuito que incluye el conductor *2*. En este caso en el conductor *1* se inducirá una f.e.m. El surgimiento de la f.e.m. en el segundo circuito a consecuencia del

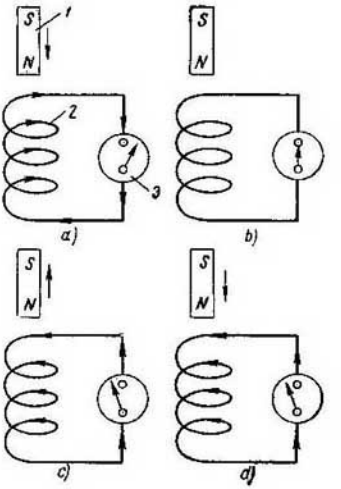


Fig. 101. Dirección de la f.e.m. inducida en función de la dirección del campo magnético y del movimiento del campo magnético con relación al conductor

cambio de la corriente eléctrica en el primer circuito se llama **inducción mutua**. Esta tiene lugar en transformadores, bobinas de inducción, etc. La f.e.m. inducida también se puede obtener del modo siguiente.

Es sabido que alrededor del conductor con corriente eléctrica existe un campo magnético. Si se cambia la magnitud o el sentido

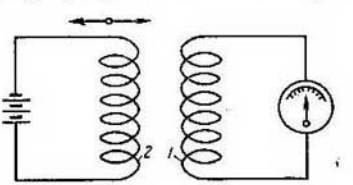


Fig. 102. Inducción mutua

de la corriente en el conductor, o se conecta y se desconecta la red eléctrica que lo alimenta, el campo magnético que rodea el conductor variará también. Al modificarse el campo magnético del conductor atraviesa el mismo conductor e induce en él una f.e.m. Este fenómeno se llama autoinducción y la f.e.m. inducida se llama f.e.m. de autoinducción.

§ 71. Dirección y magnitud de la f.e.m. inducida

La fuerza electromotriz inducida surge en los tres casos siguientes:

1) Cuando un conductor móvil atraviesa un campo magnético inmóvil o, viceversa, un campo magnético que se traslada atraviesa un conductor inmóvil; o cuando un conductor y un campo magnético moviéndose en el espacio se desplazan uno respecto al otro.

2) Cuando el campo magnético variable de un conductor, actuando sobre otro conductor induce en él una f.e.m. (inducción mutua).

3) Cuando el campo magnético variable de un conductor induce en el mismo conductor una f.e.m. (autoinducción).

De este modo, todo cambio en el tiempo de la magnitud del flujo magnético, que atraviesa un circuito conductor cerrado (espira, carrete rectangular), va acompañado por la aparición de una f. e. m. inducida en el conductor.

Como ya se ha indicado arriba, el sentido de la f.e.m. inducida depende de la dirección del movimiento del conductor y del sentido del campo magnético.

Para determinar la dirección de la f.e.m. inducida en el conductor, se emplea la «regla de la mano derecha», que consiste en lo siguiente: *si imaginamos colocada la mano derecha en un campo magnético a lo largo del conductor, de modo que las líneas magnéticas que salen del polo norte atraviesen la palma de la mano, y el dedo pulgar en abducción coincida con la dirección del movimiento del conductor, los cuatro dedos extendidos indicarán el sentido de la f.e.m. inducida en el conductor* (fig. 103).

Para determinar el sentido de la f.e.m. inducida, cuando el conductor no se desplaza y el campo magnético se mueve, hace falta suponer que el último está inmóvil y el conductor se mueve hacia el lado contrario al desplazamiento del campo magnético, y aplicar también la «regla de la mano derecha».

El fenómeno de la f.e.m. inducida se puede explicar también por medio de la teoría electrónica.

Coloquemos un conductor en un campo magnético. Los electrones libres del conductor estarán en un movimiento térmico caótico. Las cargas positivas y negativas están dispuestas uniformemente por todo el volumen del conductor y se neutralizan mutuamente. Desplacemos el conductor con velocidad determinada en un campo magnético homogéneo hacia n (fig. 104), perpendicularmente al vector de la inducción magnética. Las líneas magnéticas señaladas

con puntos están dirigidas desde el plano del dibujo hacia nosotros. Junto con el conductor se trasladan también sus átomos, núcleos y electrones.

En este caso, sobre las cargas eléctricas del conductor actuará una fuerza que comunicará a los electrones libres una componente de velocidad adicional y éstos se moverán a lo largo del conductor.

Mientras que las cargas positivas ligadas con la red cristalina del conductor no se desplazan respecto al último, los electrones

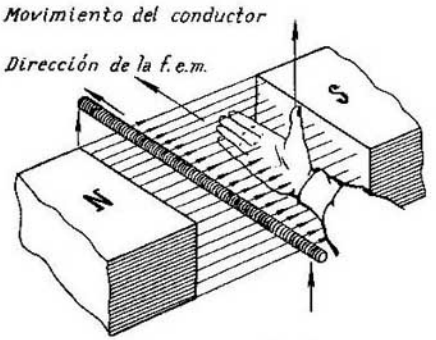


Fig. 103. Determinación de la dirección de la f.e.m. en un conductor según la «regla de la mano derecha»

libres que se mueven junto con el conductor pueden desplazarse respecto a éste.

En el ejemplo mencionado los electrones se mueven del extremo inferior del conductor al superior, lo que corresponde al movimiento de la corriente eléctrica de arriba abajo. La dirección de la f.e.m. inducida y de la corriente eléctrica en el conductor, como se puede comprobar fácilmente, concuerda con «la regla de la mano derecha».

La magnitud de la f.e.m. inducida en el conductor depende:

1) de la magnitud de inducción B del campo magnético; puesto que a mayor densidad de líneas magnéticas de inducción, mayor número de ellas atravesarán el conductor durante una unidad de tiempo (segundo);

2) de la velocidad de movimiento del conductor l en el campo magnético, ya que a mayor velocidad de desplazamiento, más líneas de inducción pueden atravesar el conductor en un segundo;

3) de la longitud activa del conductor l (que se encuentra en el campo magnético), ya que un conductor largo puede atravesar más líneas de inducción en un segundo;

4) de la magnitud del seno del ángulo α, determinado por el sentido de movimiento del conductor y la dirección del campo magnético (fig. 105).

Descompongamos el vector de velocidad del conductor en el campo magnético en sus dos componentes: v_n es la componente normal respecto a la dirección del campo ($v_n = v \cdot \operatorname{sen} \alpha$) y v_t, la componente tangencial ($v_t = v \cdot \cos \alpha$), que no interviene en la creación de la f.e.m., ya que al moverse bajo la acción de la componente

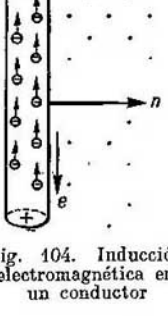


Fig. 104. Inducción electromagnética en un conductor

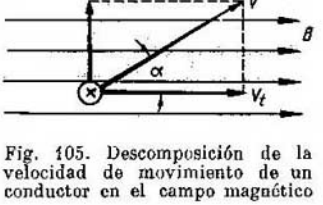


Fig. 105. Descomposición de la velocidad de movimiento de un conductor en el campo magnético

tangencial el conductor se trasladaría paralelamente al vector B y no atravesaría las líneas de inducción magnética.

El valor de la f.e.m. inducida puede ser hallado por la fórmula siguiente:

$$e = Blv \operatorname{sen} \alpha \text{ V}.$$

Después de haber estudiado la inducción electromagnética, vamos a examinar una vez más el proceso de la conversión de energía eléctrica en mecánica.

Supongamos que un conductor rectilíneo AB (fig. 106), por el que pasa una corriente eléctrica de un generador de corriente, se halle en un campo magnético exterior. Si el conductor está inmóvil, la energía de la fuente de tensión se consume solamente para calentar el conductor:

$$A = UIt = I^2Rt \text{ J}$$

La potencia consumida será igual a:

$$P_{el} = UI = I^2R \text{ W},$$

de donde determinamos la corriente eléctrica en el circuito:

$$I = \frac{U}{R} \text{ A}. \qquad (a)$$

Sin embargo, sabemos que un conductor con corriente eléctrica colocado en un campo magnético, experimentará una fuerza que tiende a desplazar el conductor, dentro del campo magnético, en el sentido determinado por «la regla de la mano izquierda». Trasladán-

dose, el conductor continuará atravesando las líneas magnéticas del campo, y según la ley de inducción electromagnética, surgirá en él una f.e.m. inducida. El sentido de esta f. e. m., determinado de acuerdo con «la regla de la mano derecha», será contrario a la

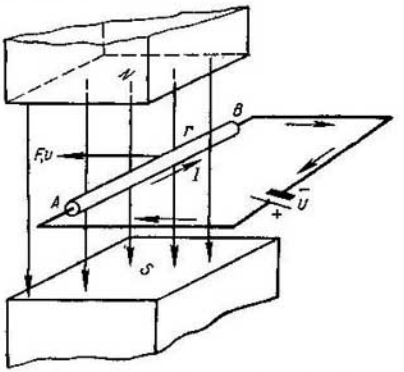


Fig. 106. Transformación de la energía eléctrica en mecánica

corriente I. Llamémosla f.e.m. inversa E_{inv}. La magnitud de E_{inv} de acuerdo con la ley de inducción electromagnética, será igual a:

$$E_{inv} = Blv \text{ V}.$$

Según la segunda ley de Kirchhoff, tenemos para un circuito cerrado:

$$U - E_{inv} = IR,$$

o bien,

$$U = E_{inv} + IR, \qquad (b)$$

de donde, la corriente en el circuito es:

$$I = \frac{U - E_{inv}}{R}. \qquad (c)$$

Comparando las igualdades (a) y (c), vemos que la corriente en un conductor, que se mueve en un campo magnético, será menor que en uno inmóvil, aunque los valores de U y R sean iguales.

Multiplicando cada miembro de la igualdad (b) por I obtendremos:

$$UI = E_{inv}I + I^2R.$$

Puesto que $E_{inv} = Blv$,

$$UI = BlvI + I^2R.$$

Teniendo en cuenta que $BlI = F$ y $Fv = P_{mec}$, tenemos:

$$UI = Fv + I^2R,$$

o bien,

$$P = P_{mec} + P_{el}.$$

La última expresión muestra que al desplazarse un conductor con corriente en un campo magnético, la potencia del generador de corriente se convierte en potencia térmica y mecánica.

§ 72. Principio de funcionamiento de un generador de corriente continua

Una máquina que convierte la energía mecánica en eléctrica se llama generador. El funcionamiento de un generador se basa en la aplicación del fenómeno de inducción electromagnética. En un

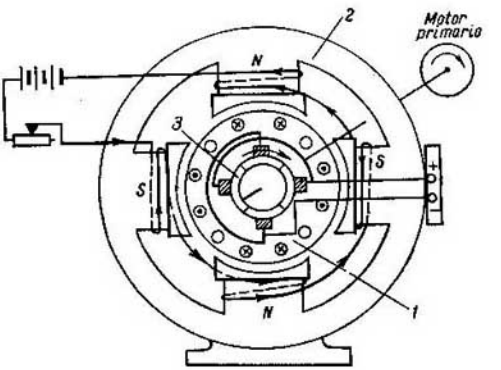


Fig. 107. Diseño de un generador de corriente continua

generador, el inducido *1* (fig. 107) con su devanado se pone en rotación, por el motor primario, en el campo magnético de los polos *N* y *S* de los electroimanes *2*. La fuerza electromotriz que se induce en los conductores del devanado del inducido se lleva al circuito exterior mediante el colector *3* y las escobillas. Gracias al colector, la corriente que suministran los devanados del inducido al circuito exterior, será una corriente continua.

Para hacer girar el generador, como motor primario se puede emplear una máquina de vapor, turbina de vapor, turbina hidráulica, motor de combustión interna, motor eólico o motor eléctrico.

§ 73. Ley de Lenz

En 1834 el académico ruso Lenz, conocido por sus numerosas investigaciones en electromagnetismo, estableció una ley universal para determinar el sentido de la f.e.m. inducida en un conductor. Este principio conocido como ley de Lenz se formula del modo siguiente.

El sentido de la f.e.m. inducida es tal, que la corriente generada por ella y su campo magnético tienen dirección opuesta a la causa que origina la f.e.m. inducida.

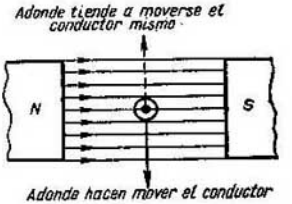


Fig. 108. Oposición del conductor con corriente inducida a su movimiento

La ley de Lenz se comprueba con lo siguiente:

1. Si colocamos un conductor en un campo magnético, como se indica en la fig. 108, al desplazarlo hacia abajo, el conductor atravesará este campo magnético. Entonces en el conductor se induce una f.e.m. cuyo sentido se puede determinar por «la regla de la mano derecha».

En el caso que estudiamos, el sentido de la f.e.m. inducida, así como el de la corriente, será «hacia nosotros». Vamos a ver de qué modo se comporta el conductor con corriente en un campo magnético. De lo anteriormente dicho se sabe que el conductor será empujado hacia afuera por el campo magnético. La dirección de ese movimiento se determina según «la regla de la mano izquierda». En el caso que examinamos, la fuerza de empuje está dirigida hacia arriba. De este modo, la corriente inducida interactuando con el campo magnético se opone al movimiento del conductor, es decir, reacciona contra la causa que la origina.

2. Para el experimento montemos el circuito que se expone en la fig. 109. Introduciendo el imán en la bobina (con el polo norte abajo) notaremos que la aguja del galvanómetro se desvía. El experimento muestra que el sentido de la corriente inducida en la bobina es como está indicado por las flechas en la fig. 109, *a*. Supongamos que le corresponde la inclinación de la aguja a la izquierda de la posición media cero. Por lo tanto, la bobina parece convertirse en un solenoide y el sentido indicado de la corriente crea en su parte superior el polo norte, y abajo, el polo sur. Puesto que los

polos del mismo signo del imán y del solenoide se repelen, la corriente inducida en la bobina impedirá el movimiento del imán permanente, es decir, se opondrá a la causa que la origina.

Si sacamos el imán permanente de la bobina, la aguja del galvanómetro se inclinará a la derecha (fig. 109,*b*). A esta desviación de la aguja del galvanómetro, como muestra el experimento, le

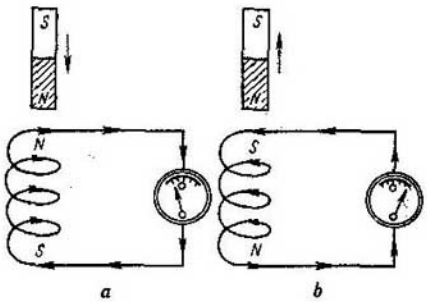


Fig. 109. Oposición del solenoide al movimiento de un imán: *a* — abajo, *b* — hacia arriba

corresponde el sentido de la corriente inducida, indicado con las flechas en la fig. 109,*b* que es contrario al de la corriente en la fig. 109,*a*.

Determinando los polos de la bobina según la «regla del sacacorchos", nos convencemos de que el polo sur estará ahora en la parte superior de la bobina, y el norte, en la inferior. Los polos contrarios del imán y del solenoide, atrayéndose, frenarán el movimiento del imán. Por consiguiente, la corriente inducida se opondrá de nuevo a la causa que la origina.

3. Cerrando el circuito *I* (fig. 110,*a*) dejamos pasar la corriente por el conductor *AB*. La dirección de la corriente se muestra con flechas. El campo magnético alrededor del conductor *AB*, creado por la corriente surgida, esparciéndose en todos los sentidos, atravesará el conductor *CD* y en el circuito *II* surgirá una f. e. m. inducida. Por cuanto el circuito *II* está cerrado con el galvanómetro, en él surgirá una corriente. El galvanómetro en este caso se intercala del mismo modo que en el experimento anterior.

Al inclinarse a la izquierda, la aguja del galvanómetro indicará que la corriente pasa por el instrumento de arriba hacia abajo. Comparando la dirección de las corrientes en los conductores *AB* y *CD*, vemos que éstas son contrarias.

Como ya sabemos, los conductores, en los cuales las direcciones de las corrientes son contrarias, se repelen. Por eso el conductor *CD* con corriente inducida tenderá a apartarse del conductor *AB*

(del mismo modo que el conductor AB del CD), para evitar el efecto del campo del conductor AB, y, de este modo, oponerse a la causa que origina la corriente inducida.

La corriente inducida en el circuito *II* durará un tiempo breve. La corriente en el circuito *II* desaparecerá, tan pronto como se establezca el flujo magnético del conductor AB, y el campo magnético del conductor AB no atraviese más el conductor CD.

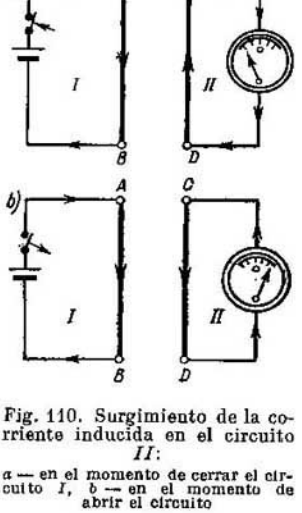


Fig. 110. Surgimiento de la corriente inducida en el circuito *II*:
a — en el momento de cerrar el circuito *I*, *b* — en el momento de abrir el circuito

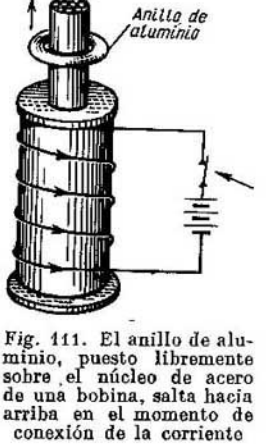


Fig. 111. El anillo de aluminio, puesto libremente sobre el núcleo de acero de una bobina, salta hacia arriba en el momento de conexión de la corriente

Al abrir el circuito *I*, la corriente eléctrica que desaparece provoca la disminución del campo magnético, cuyas líneas de inducción, atravesando el conductor CD, inducirán en él la corriente en el mismo sentido que en el conductor AB (fig. 110,*b*).

Sabemos que los conductores con corrientes en la misma dirección se atraen. Por eso, el conductor CD tenderá a aproximarse al conductor AB, para mantener su decreciente campo magnético.

4. Tomemos una bobina con núcleo de sección circular, compuesto de pedazos de alambre de acero, sobre el cual está puesto un anillo de aluminio (fig. 111). Al cerrar el circuito, por el devanado de la bobina empieza a pasar una corriente eléctrica que crea un campo magnético, cuyas líneas de inducción, atravesando el anillo de aluminio, inducen en él una corriente eléctrica. Al conectar la bobina, en el anillo de aluminio surge una corriente inducida,

dirigida en dirección contraria a la que fluye en las espiras de la bobina. Los conductores con corrientes contrarias se repelen. Por eso, al conectar la bobina, el anillo de aluminio salta hacia arriba.

Para nosotros está ahora claro, que con cualquier cambio en el tiempo del flujo magnético que atraviesa el circuito, en éste surge una f.e.m. inducida que se determina por la igualdad:

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

La expresión $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ es la velocidad media del cambio del flujo magnético en el tiempo. Cuanto menor sea el intervalo de tiempo Δt, tanto menor se apartará el valor de la f.e.m., indicada anteriormente, de su valor verdadero en el momento dado. El signo menos que está ante la expresión $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, indica el sentido de la f.e.m. inducida de acuerdo con la ley de Lenz.

Al aumentar el flujo magnético, la expresión $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ será positiva, y la f.e.m., negativa. En esto consiste la ley de Lenz: la f.e.m. y la corriente creada por ella, se oponen a la causa que las origina.

Al cambiar uniformemente el flujo magnético en el tiempo, la expresión $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ será constante. Entonces el valor absoluto de la f.e.m. en el conductor será igual a:

$$e = \frac{\Phi}{t}.$$

El valor del flujo magnético será:

$$[\Phi] = [e \cdot t] = \text{V} \cdot \text{seg o Wb}.$$

Si tenemos una bobina compuesta de w espiras y no un solo conductor, el valor de la f.e.m. inducida será:

$$e = -w\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

El producto del número de espiras de la bobina por el flujo concatenado con dichas espiras se denomina *concatenamiento magnético* y se designa con la letra Ψ. Por eso la ley de la inducción electromagnética se puede escribir también de esta forma:

$$e = -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t}.$$

§ 74. Corrientes parásitas

Examinando el principio del funcionamiento de un generador, hemos visto, que durante su rotación se induce una f.e.m. en los conductores del devanado del inducido cuando éstos atraviesan el campo magnético. Puesto que el inducido de acero atraviesa las

mismas líneas de inducción magnéticas que los conductores, también en él se inducen corrientes. La corriente que se induce en los cuerpos metálicos al ser atravesados por líneas magnéticas, lleva el nombre de corriente parásita o corriente de Foucault.

En la fig. 112 se muestra esquemáticamente el inducido que gira en un campo magnético. Las corrientes parásitas en el inducido, que son representadas convencionalmente con flechas punteadas, pasando por el cuerpo del inducido, lo calientan, consumiendo para

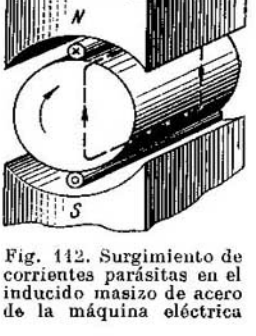


Fig. 112. Surgimiento de corrientes parásitas en el inducido masizo de acero de la máquina eléctrica

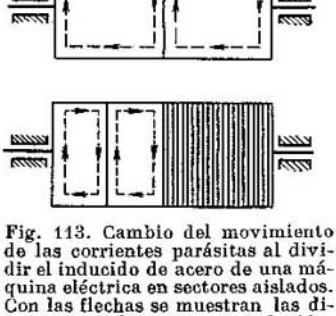


Fig. 113. Cambio del movimiento de las corrientes parásitas al dividir el inducido de acero de una máquina eléctrica en sectores aislados. Con las flechas se muestran las direcciones de las corrientes inducidas

ello energía. Si no se toman medidas para reducir las corrientes parásitas, éstas, al calentar excesivamente el inducido, provocarán el deterioro del aislamiento de su devanado. No se puede evitar por completo las pérdidas provocadas por las corrientes parásitas, pero es posible y necesario reducirlas.

Para reducir las pérdidas provocadas por las corrientes parásitas, los inducidos de generadores, motores eléctricos y núcleos de transformadores se preparan con chapas finas de acero dulce (de 0,35 a 0,5 mm) orientadas a lo largo de las líneas del flujo magnético y aisladas una de otra con barniz o papel fino. Esto se hace para reducir la cantidad de líneas del flujo magnético que pasa a través de cada chapa de acero, debido a su pequeña sección transversal, y, por lo tanto, reducir la f.e.m. y las corrientes inducidas en ella.

El paso de las corrientes parásitas por el cuerpo del inducido, dividido en sectores aislados, se muestra esquemáticamente en la fig. 113.

Para debilitar aún más las corrientes parásitas se aumenta la resistencia específica de acero añadiéndole un 4% de silicio. Este acero se llama aleado.

Sin embargo, las corrientes parásitas no son siempre dañosas; en algunos casos encuentran también su aplicación. Por ejemplo, estas corrientes se utilizan para templar las piezas de acero con corrientes de alta frecuencia, en el trabajo de los instrumentos

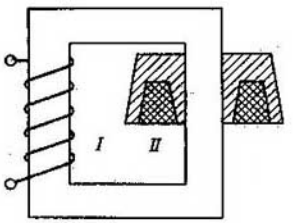


Fig. 114. Esquema de un horno de inducción

eléctricos de medición por inducción, contadores y relés de corriente alterna (descritos a continuación).

En los hornos eléctricos de inducción (fig. 114) las corrientes parásitas, inducidas por el devanado primario *I* en el secundario *II*, que es una masa de metal, son tan intensas y el calor desarrollado por ellas es tan elevado que el metal se funde.

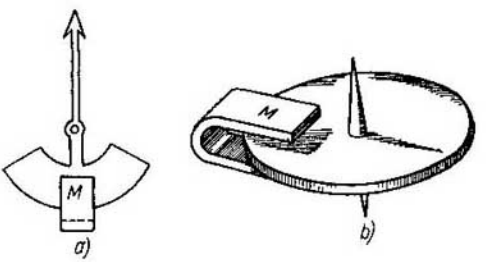


Fig. 115. Frenos electromagnéticos

En los instrumentos de medición son instalados frecuentemente frenos electromagnéticos (fig. 115). Al oscilar la aguja (fig. 115,*a*) o al girar el disco (fig. 115,*b*) los frenos atraviesan el campo del imán *M* y en ellos se inducen corrientes parásitas, que según la ley de Lenz tienen dirección contraria a la causa que las origina. De este modo estas corrientes frenarán el giro del disco y reducirán las oscilaciones de la aguja, amortiguándolas rápidamente.

§ 75. F.e.m. de autoinducción e inductancia del circuito

Si se cierra el interruptor, en el circuito representado en la fig. 116 surge una corriente eléctrica, cuya dirección se indica con las flechas simples. Tan pronto como aparezca la corriente en el circuito, surge un campo magnético, cuyas líneas de inducción atraviesan el conductor e inducen en el mismo una f.e.m. Como se indicó anteriormente, esta f.e.m. se llama f.e.m. de autoinducción. Ya que cualquier f.e.m. inducida se opone, según la ley de Lenz, a la causa que la origina y esta causa es la f.e.m. de las

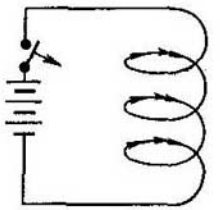


Fig. 116. La f.e.m. de autoinducción en el momento de cerrar el circuito está dirigida contra la f.e.m. del generador de tensión

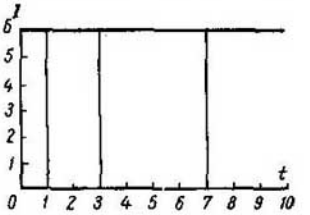


Fig. 117. Gráfica de corriente continua

pilas, la f.e.m. de autoinducción se opondrá a la de esta batería de pilas. La dirección de la f.e.m. de autoinducción se muestra en la fig. 116 con flechas dobles.

De este modo, la corriente eléctrica se establece paulatinamente en el circuito. Solamente cuando se establezca el flujo magnético, cesará la intersección del conductor por las líneas magnéticas y la f.e.m. de autoinducción desaparecerá. En este caso por el circuito pasará una corriente continua.

En la fig. 117 se representa la gráfica de una corriente continua. En el eje horizontal se marca el tiempo, en el vertical, la corriente. Según la gráfica, vemos que, si en el primer instante la corriente es igual a 6 A, en el tercero, séptimo, etc. la corriente también será igual a 6 A.

En la fig. 118 se muestra de qué manera se establece la corriente en un circuito después de cerrarlo. La f.e.m. de autoinducción, contraria a la de la batería de pilas en el momento de conexión, debilita la corriente en el circuito y por eso, al cerrar el circuito, la corriente en el mismo es nula. Después, en el primer instante, la corriente es igual a 2 A, en el segundo, a 4 A; en el tercero, a 5 A, y solamente transcurrido cierto tiempo se establece en el circuito la corriente de 6 A.

Al abrir el circuito (fig. 119), la corriente que desaparece, cuyo sentido está indicado con la flecha simple, reducirá su campo magné-

tico, el cual disminuyéndose desde cierto valor hasta cero, volverá a atravesar el conductor e inducirá en él una f.e.m. de autoinducción.

Al abrir el circuito, la f.e.m. de autoinducción estará dirigida en el mismo sentido que la del generador de corriente. La dirección

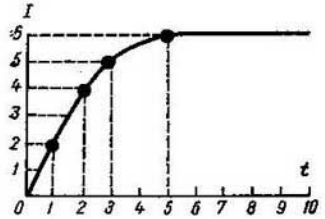


Fig. 118. Gráfica del incremento de la corriente en el circuito, tomando en consideración la f.e.m. de autoinducción

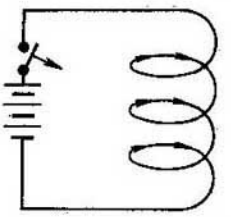


Fig. 119. La f.e.m. de autoinducción en el momento de abrir el circuito tiene la misma dirección que la f.e.m. del generador de tensión

de la f.e.m. de autoinducción se muestra en la fig. 119 con la flecha doble. Como resultado de la acción de la f.e.m. de autoinducción, la corriente eléctrica en el circuito, al desconectarlo, desaparece paulatinamente.

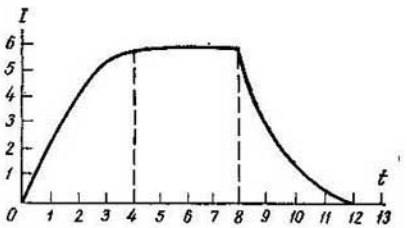


Fig. 120. Gráfica de incremento y desaparición de la corriente en el circuito, teniendo en cuenta la f.e.m. de autoinducción

De este modo, la f.e.m. de autoinducción está siempre dirigida contra la causa que la origina. Indicando esta propiedad, se dice que la f.e.m. de autoinducción tiene un carácter reactivo.

El cambio de la corriente eléctrica en el circuito examinado, teniendo en cuenta la f.e.m. de autoinducción al cerrarlo y al abrirlo después, en octavo instante, se muestra gráficamante en la fig. 120.

Al abrir los circuitos que comprenden gran número de espiras y núcleos masivos de acero, o, como se dice, que tienen gran induc-

tancia, la f.e.m. de autoinducción puede ser mucho mayor que la f.e.m. del generador de corriente. Entonces en el momento de desconexión, el espacio aéreo entre la cuchilla y el ajuste fijo del interruptor será perforado y el arco eléctrico que surge fundirá las piezas de cobre del interruptor de cuchilla, y si falta la camisa protectora sobre éste, el personal de servicio puede quemarse las manos (fig. 121).

Dentro del circuito, la f.e.m. de autoinducción puede perforar el aislamiento de las espiras de las bobinas, electroimanes, etc.

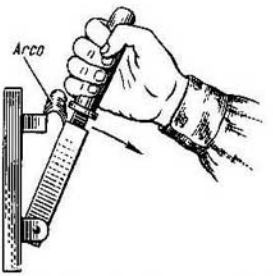


Fig. 121. Corrientes inducidas al abrir el circuito

Para evitarlo, en algunos dispositivos interruptores se hace un contacto especial, que cortocircuita el devanado del electroimán durante la desconexión.

Hay que tener en cuenta, que la f.e.m. de autoinducción se manifiesta no sólo en los momentos de cerrar y abrir el circuito, sino también cuando tiene lugar cualesquiera cambios en la corriente eléctrica.

La magnitud de la f.e.m. de autoinducción depende de la velocidad de cambio de la corriente en el circuito. Así, por ejemplo, si para un mismo circuito, en un caso, la corriente eléctrica ha cambiado durante 1 seg de 50 a 40 A (es decir, 10 A) y en otro caso, de 50 a 20 A (es decir, 30 A), en el segundo caso en el circuito se inducirá una f. e. m. de autoinducción tres veces mayor que en el primero.

La magnitud de la f.e.m. de autoinducción depende también de la inductancia propia del circuito. Circuitos con gran inductancia son: devanados de generadores, motores eléctricos, transformadores y bobinas de inducción con núcleos de acero. Los conductores rectilíneos tienen menor inductancia. Los conductores rectilíneos cortos, lámparas de incandescencia y aparatos eléctricos para calentamiento (estufas, hornos) no tienen prácticamente inductancia, y casi no surge en ellos la f.e.m. de autoinducción.

El flujo magnético que atraviesa el circuito e induce en éste una f. e. m. de autoinducción es proporcional a la corriente que fluye por el circuito:

$$\Phi = LI$$

donde L = coeficiente de proporcionalidad denominado inductancia. El valor de la inductancia es:

$$[L] = \left[\frac{\Phi}{I}\right] = \frac{\text{V} \cdot \text{seg}}{\text{A}} = \text{ohmio} \cdot \text{seg},$$

ohmio·seg se llama también henrio (H).

1 henrio = 10^3 milihenrios (mH) = 10^6 microhenrios (MH). Además del henrio, la inductancia se mide en centímetros:

$$1 \text{ henrio} = 10^9 \text{ cm}.$$

Así, por ejemplo, 1 km de línea telegráfica tiene una inductancia de 0,002 H. La inductancia de los devanados de electroimanes potentes alcanza varias centenas de henrios.

Si la corriente en un circuito ha cambiado en Δi, el flujo magnético variará en la magnitud $\Delta\Phi$:

$$\Delta\Phi = L\Delta i,$$

La f.e.m. de autoinducción que surgirá en el circuito será igual a:

$$e_L = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Si la corriente eléctrica cambia uniformemente en el tiempo, la expresión $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ será constante y puede ser sustituida por $\frac{I}{t}$. Entonces el valor absoluto de la f.e.m. de autoinducción que surge en el circuito, puede ser encontrado del modo siguiente:

$$E_L = L\frac{I}{t}.$$

Basándose en la última fórmula, se puede definir la unidad de inductancia, es decir, el henrio:

$$1\text{V} = 1\text{H} \cdot \frac{1\text{A}}{1\text{ seg}}.$$

El conductor posee la inductancia de 1 H, si al variar la corriente uniformemente en 1 A durante 1 seg se induce en este conductor la f.e.m. de autoinducción de 1 V.

Ya hemos visto que la f.e.m. de autoinducción surgo en el circuito con corriente continua solamente en el instante de su apertura, cierre o si tiene lugar cualquier variación de corriente. Si, en cambio, la magnitud de la corriente en el circuito es invariable, el flujo magnético del conductor es constante y la f.e.m. de autoinducción no puede surgir (ya que $\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0$). En el momento de cambiar

la corriente en el circuito, la f.e.m. de autoinducción se opone a los cambios de la corriente, es decir, le opone una especie de resistencia.

En la práctica son frecuentes los casos cuando es necesario hacer una bobina que no tenga inductancia (resistencias adicionales para instrumentos eléctricos de medición, resistencia de reóstatos de clavija, etc.). En este caso se emplea un devanado bifilar en la bobina (fig. 122).

Del dibujo se deduce fácilmente que las corrientes eléctricas que fluyen por los conductores vecinos tienen sentidos contrarios. Por



Fig. 122. Devanado bifilar de una bobina

lo tanto, los campos magnéticos de los conductores vecinos se eliminan mutuamente. El flujo magnético total y la inductancia de la bobina serán nulos. Para aclarar completamente el concepto de la inductancia, citaremos un ejemplo de la mecánica.

Como sabemos por la física, según la segunda ley de Newton, la aceleración recibida por el cuerpo bajo la acción de una fuerza es directamente proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a la masa del cuerpo:

$$a = \frac{F}{m},$$

o bien,

$$F = ma = m\frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Comparemos la última fórmula con la de la f.e.m. de autoinducción, tomando el valor absoluto de la f.e.m.:

$$e_L = L\frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Si en estas fórmulas comparamos el cambio de la velocidad en el tiempo $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ con la variación de la corriente en el tiempo $\frac{\Delta i}{\Delta t}$, la fuerza mecánica, con la fuerza electromotriz de autoinducción, la masa del cuerpo corresponderá a la inductancia del circuito.

Si el movimiento es uniforme y rectilíneo, $a = 0$, entonces, $F = 0$, es decir, si sobre el cuerpo no accionan fuerzas, su movimiento será rectilíneo y uniforme (primera ley de Newton).

En los circuitos de corriente continua el valor de ésta no varía $\left(\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0\right)$ y por consiguiente $e_L = 0$.

§ 76. Inducción mutua

En el § 70 se ha dicho, que la acción del campo magnético variabl de un conductor sobre otro conductor, a consecuencia de lo cua en el segundo surge una f.e.m. inducida, se llama inducción mutua

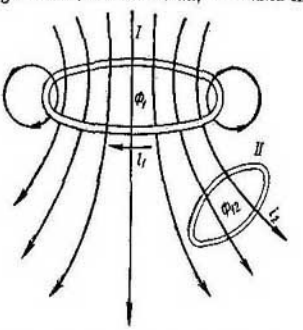


Fig. 123. Fenómeno de inducción mutua

Supongamos que tenemos dos conductores *I* y *II* (fig. 123), dos bobinas o dos circuitos. La corriente que fluye por el primer conductor i_1, se suministra de un generador de corriente (en la figura no se muestra). La corriente i_1 forma un flujo magnético Φ_1, una parte del cual Φ_{12} atraviesa el segundo conductor, y otra parte Φ_{11} se cierra fuera del segundo conductor:

$$\Phi_1 = \Phi_{12} + \Phi_{11}.$$

Si en lugar de conductores tomamos dos bobinas con el número de espiras w_1 y w_2 el concatenamiento magnético del segundo circuito será:

$$\psi_{12} = w_2 \Phi_{12}.$$

Puesto que el flujo Φ_{12} es proporcional a la corriente i_1, la dependencia entre el concatenamiento magnético ψ_{12} y la corriente i_1 será:

$$\psi_{12} = M_{12} i_1,$$

de donde

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_1} = \frac{w_2 \Phi_{12}}{i_1},$$

donde M_{12} es el coeficiente de proporcionalidad, denominado inductancia mutua de dos bobinas (o circuitos).

El valor de la inductancia mutua se determina del modo siguiente:

$$[M] = \left[\frac{w\Phi}{i_1}\right] = \frac{\text{V}\cdot\text{seg}}{\text{A}} = \text{ohmio}\cdot\text{seg o henrio.}$$

Por consiguiente, la inductancia mutua M se mide en las mismas unidades que la inductancia L.

La inductancia mutua depende del número de espiras de las bobinas, sus dimensiones, situación relativa de las bobinas y permeabilidad magnética del medio ambiente en el cual se encuentran las bobinas.

Si hacemos pasar la corriente i_2 por el segundo conductor, se puede anotar por analogía:

$$\Psi = w_1\Phi_{21} \text{ y } \Psi = M_{21}i_2,$$

de donde $M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_2} = \frac{w_1\Phi_{21}}{i_2}$.

Aplicando la ley de Ohm para el circuito magnético se puede demostrar que:

$$\Phi_{12} = \frac{i_1 w_1}{R_m} \text{ y } \Phi_{21} = \frac{i_2 w_2}{R_m},$$

donde R_m es la reluctancia del circuito cerrado por el que pasan los flujos magnéticos Φ_{12} y Φ_{21}.

En las expresiones

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_1} \text{ y } M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_2},$$

introducimos los valores

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_1} = \frac{w_2\Phi_{12}}{i_1} = \frac{w_2 i_1 w_1}{i_1 R_m} = \frac{w_1 w_2}{R_m},$$

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_2} = \frac{w_1\Phi_{21}}{i_2} = \frac{w_1 i_2 w_2}{i_2 R_m} = \frac{w_1 w_2}{R_m}.$$

De este modo, $M_{12} = M_{21} = M$.

Por lo tanto, la inductancia mutua de dos circuitos concatenados inductiva o magnéticamente no depende de qué circuito crea el flujo magnético.

Al cambiar la corriente i_1, los flujos magnéticos Φ_{11} y Φ_{12} también variarán en el segundo circuito; surgirá la f.e.m. inducida cuya magnitud será igual a:

$$e_{M_2} = -\frac{\Delta\Psi_{12}}{\Delta t} = -w_2\frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta t} = -M\frac{\Delta i_1}{\Delta t};$$

análogamente

$$e_{M_1} = -\frac{\Delta\Psi_{21}}{\Delta t} = -w_1\frac{\Delta\Phi_{21}}{\Delta t} = -M\frac{\Delta i_2}{\Delta t}.$$

Estas f.e.m. se llaman f.e.m. de inducción mutua. Si el primer circuito posee la resistencia R_1 e inductancia L_1, la tensión

U_1 aplicada a este circuito debe equilibrar las f.e.m. de autoinducción e inducción mutua y también la caída de tensión en la resistencia R_1 del circuito:

$$U_1 = L_1 \frac{\Delta i_1}{\Delta t} + M \frac{\Delta i_2}{\Delta t} + i_1 R_1.$$

Para el segundo circuito:

$$U_2 = L_2 \frac{\Delta i_2}{\Delta t} + M \frac{\Delta i_1}{\Delta t} + i_2 R_2.$$

Entre las inductancias L_1 y L_2 de los circuitos y la inductancia mutua M existe la siguiente relación:

$$M = \sqrt{L_1 L_2}.$$

Sin embargo, esta fórmula es justa solamente cuando todo el flujo, creado por el primer circuito, concatena con las espiras del segundo circuito. En la práctica M es menor que $\sqrt{L_1 L_2}$, es decir:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}; \qquad k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}.$$

La magnitud k es menor que la unidad y se llama coeficiente de concatenamiento de las bobinas. Este coeficiente sería igual a la unidad, si $\Phi_{12} = \Phi_1$ y $\Phi_{21} = \Phi_2$.

El concatenamiento electromagnético de dos circuitos puede ser cambiado si se van acercando o alejando los circuitos uno del otro, y también si se cambia su posición relativa.

En la técnica se emplean aparatos que funcionan basándose en el principio de inducción mutua y que sirven para cambiar la inductancia del circuito. Tales aparatos se llaman variómetros. Estos constan de dos bobinas conectadas en serie, una de las cuales puede girar en el interior de la otra.

Supongamos que ambas bobinas están situadas de tal manera que sus ejes sean paralelos y los campos magnéticos de las bobinas estén dirigidos en el mismo sentido (conexión acorde). En este caso:

$$U = i(R_1 + R_2) + L_1 \frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2 \frac{\Delta i}{\Delta t} + 2M \frac{\Delta i}{\Delta i} =$$

$$= i(R_1 + R_2) + \frac{\Delta i}{\Delta t}(L_1 + L_2 + 2M) = iR + L' \frac{\Delta i}{\Delta t},$$

donde la inductancia del sistema es:

$$L' = L_1 + L_2 + 2M.$$

Si hacemos girar 180° la bobina interior, los flujos magnéticos estarán dirigidos en sentido contrario (conexión contraria). En este caso:

$$U = i(R_1 + R_2) + L_1 \frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2 \frac{\Delta i}{\Delta t} - 2M \frac{\Delta i}{\Delta t} = iR + L'' \frac{\Delta i}{\Delta t},$$

donde

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M.$$

Haciendo girar la bobina interior entre la primera y la segunda posiciones, podremos variar la inductancia del sistema en los límites de L' a L''.

Según el principio de la inducción mutua funcionan los transformadores que se usan ampliamente en la técnica.

Ocurre que la inducción mutua es indeseable: dos líneas de comunicaciones (teléfono) se influyen mutuamente, interfiriendo una a otra. Las líneas de alta corriente colocadas en paralelo y cerca de la línea de comunicación, inducen en la última corriente que provocan en ella ruidos y chasquidos que estorban la comunicación telefónica.

§ 77. Principio de funcionamiento de un transformador

El transformador es un aparato que convierte la corriente alterna de una tensión en corriente alterna de otra tensión, pero de la misma frecuencia (fig. 124).

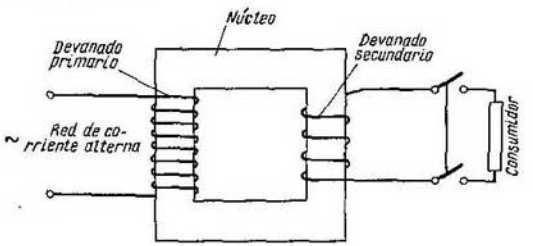


Fig. 124. Esquema de un transformador

El transformador tiene la siguiente construcción. Sobre un núcleo de acero dulce van arrollados dos devanados. El devanado al cual se suministra la tensión se llama primario. La corriente, pasando por el devanado primario, crea un campo magnético, cuyas líneas de inducción se cierran en el núcleo. El devanado en el cual se induce a f.e.m. que se emplea después en el circuito exterior se llama secundario.

Si para alimentar el devanado primario de un transformador nos servimos de pilas eléctricas, acumuladores o generadores de corriente continua, la f.e.m. inducida en el devanado secundario surgirá sólo en los momentos de su variación. Por eso, los consumidores, como, por ejemplo, lámparas de incandescencia, en este caso no se pueden alimentar del devanado secundario del transformador.

Pero si alimentamos el devanado primario del transformador con corriente alterna, es decir, con corriente que varía, con frecuencia determinada, en magnitud y dirección, en el devanado secundario cerrado pasará también una corriente alterna y las lámparas eléctricas conectadas a éste arderán uniformemente, sin centelleo. De aquí se ve que el trabajo de un transformador se basa en la aplicación del fenómeno de inducción mutua.

§ 78. Bobina de inducción

La bobina de inducción (fig. 125) es una especie de transformador. Se compone del núcleo *1* (armado de trozos de alambre de acero), sobre el cual van arrolladas varias espiras de alambre grueso aislado *2*. Estas espiras son el devanado primario de la bobina de inducción. Por encima del devanado primario se arrolla otro devanado *3*

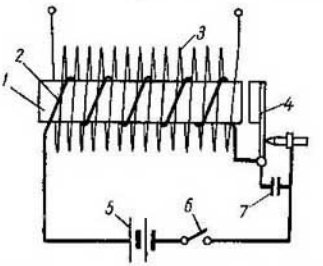


Fig. 125. Esquema de una bobina de inducción

de alambre fino aislado con gran número de espiras (de 16.000 a 1.000.000 y más). Esto es el devanado secundario de la bobina de inducción. El devanado primario se conecta a través de un ruptor mecánico *4* a una fuente de corriente continua *5* (batería de pilas eléctricas, de acumuladores, etc.).

Al cerrar el interruptor *6* la corriente de la batería pasa por el devanado primario de la bobina y magnetiza su núcleo. El núcleo magnetizado atrae el inducido del ruptor, debido a lo cual se abre el circuito del devanado primario. En el instante siguiente el núcleo desmagnetizado deja libre el inducido del ruptor. Este, bajo la acción del muelle, vuelve a su posición inicial, cierra el circuito del devanado primario, y el proceso se repite nuevamente.

Como resultado de conexiones y desconexiones alternativas del circuito, en el devanado primario de la bobina pasa una corriente intermitente. El campo magnético variable del devanado primario, interseccando las espiras del devanado secundario, induce en éste una f.e.m. Al cerrarse el circuito primario, la f.e.m. en el devanado secundario tiene una dirección, al abrirse, otra. El gran número

de espiras da la posibilidad de obtener en los extremos del devanado secundario una tensión de varios miles, y a veces, de centenares de miles de voltios. La capa de aire entre los bornes del devanado secundario se perfora y surge una chispa cuya longitud en grandes bobinas de inducción alcanza 1 m.

Para obtener mayor f.e.m. en el devanado secundario, es necesario que la corriente en el circuito primario varíe lo más rápidamente posible. Sin embargo, la chispa en el ruptor mecánico que surge al abrirse sus contactos no da posibilidad a la corriente de interrumpirse momentáneamente. Para que la chispa desaparezca lo más rápidamente posible, al lugar de ruptura se conecta en paralelo el condensador 7.

El devanado primario de la bobina de inducción se puede alimentar también con corriente alterna. Entonces no se necesita el ruptor.

Con la ayuda de la bobina de inducción han sido realizados muchos importantes descubrimientos físicos. Las bobinas de inducción se utilizan ampliamente para encender la mezcla explosiva en los motores de automóviles y de aviones, etc.

Problemas

1. En un campo magnético uniforme cuya inducción es igual a 6.000 Gs se desplaza un conductor en un ángulo de 30° respecto a la dirección del campo. La longitud del conductor es de 50 cm. La velocidad de su movimiento es de 2,5 m/seg. Determinar la magnitud de la f.e.m. inducida.
2. El flujo magnótico de $0{,}6 \cdot 10^6$ Mx, que atraviesa una bobina que consta de 200 espiras, disminuye hasta cero durante 0,05 seg. Determinar la magnitud de la f.e.m. inducida en la bobina.
3. Durante 0,01 seg la corriente en una bobina ha variado uniformemente en 200 A. Determinar la magnitud de la f.e.m. de autoinducción, si la inductancia de la bobina es de 0,05 H.
4. Determinar la inductancia de una bobina que consta de 100 espiras, si al variarse la corriente uniformemente en 20 A el flujo magnético varía en 0,6 Wb.

Preguntas de control

1. ¿Qué es la inducción electromagnética?
2. ¿En qué casos surge la f.e.m. inducida?
3. ¿De qué depende la dirección de la f.e.m. inducida?
4. ¿Cómo determinar la dirección de la f.e.m. inducida en un conductor?
5. ¿De qué factores depende la magnitud de la f.e.m. inducida en un conductor?
6. Explíquese el principio de acción de un generador de corriente continua.
7. ¿Qué expresa la ley de Lenz y con qué experimentos se puede confirmarla?
8. ¿Qué es la inducción mutua?
9. Explíquese el principio de funcionamiento de un transformador.
10. ¿Qué es la bobina de inducción?
11. ¿Qué son corrientes parásitas y qué medidas se toman para reducirlas?
12. ¿Qué es la autoinducción?
13. ¿Cómo se manifiesta la autoinducción en circuitos de corriente continua?

VII

CORRIENTE ALTERNA MONOFASICA

§ 79. Obtención de la corriente alterna

Supongamos que tenemos un campo magnético homogéneo formado entre los polos *NS* de un electroimán (fig. 126, *a*). En el interior del campo, bajo la acción de una fuerza ajena, se desplaza describiendo una circunferencia en el sentido de las manecillas del reloj un conductor metálico rectilíneo. Como es sabido, la intersección de las líneas magnéticas por el conductor llevará a la aparición en el mismo de una f.e.m. inducida. La magnitud de dicha f.e. m., como ha sido indicado anteriormente (§ 71), depende de la magnitud de la inducción magnética B, longitud activa del conductor l, velocidad de intersección de las líneas magnéticas v por el conductor y seno del ángulo α entre la dirección del movimiento del conductor y la del campo magnético.

$$e = Blv \operatorname{sen} \alpha.$$

Descompongamos la velocidad circunferencial v en sus dos componentes: normal y tangencial con relación al sentido de la inducción magnética B, como se ha mostrado en el § 71. La componente normal de la velocidad v_n condiciona la f.e.m. inducida que surge y es igual a:

$$v_n = v \operatorname{sen} \alpha.$$

La componente tangencial de la velocidad v_t no participa en la creación de la f.e.m. inducida y es igual a:

$$v_t = v \cos \alpha;$$

cuando $\alpha = 90°$, la velocidad normal

$$v_n = v \operatorname{sen} \alpha = v \operatorname{sen} 90° = v,$$

es decir, en este caso la componente normal de la volocidad tiene su máximo valor. El mismo valor tiene en este momento la magnitud de la f.e.m. inducida en el conductor:

$$e = Blv = E_m,$$

de donde, la expresión general para la f.e.m. en el conductor será:

$$e = E_m \operatorname{sen} \alpha \text{ o } e = \operatorname{sen} \alpha.$$

Durante el movimiento el conductor ocupará diversas posiciones. En el dibujo las posiciones del conductor se dan cada 45° de ángulo de giro. Al examinar las posiciones del conductor, vemos que el ángulo de intersección α varía y, al pasar el conductor la línea neutra, la dirección de la f.e.m. inducida, determinada según «la regla de la mano derecha», también cambia. Compongamos para mayor claridad una tabla de magnitudes y direcciones de la f.e.m.

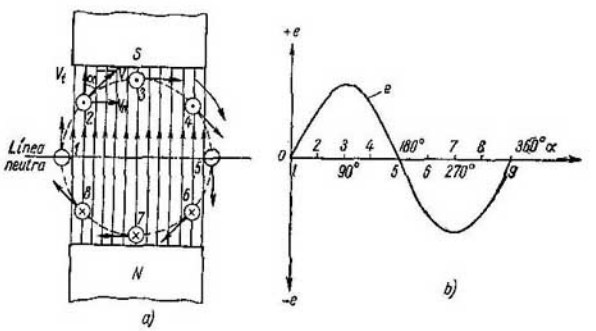


Fig. 126. Obtención de la corriente alterna:
a — giro del conductor en un campo magnético homogéneo, b — gráfica de la variación de la corriente alterna

(proporcional al sen α) en función de la posición del conductor y del ángulo entre los vectores de la inducción y la velocidad de rotación del conductor (tabla 16).

En la tabla se ve que en una vuelta completa del conductor, la f.e.m. en éste primeramente aumenta desde cero hasta el valor máximo, después disminuye hasta cero y, después de cambiar su dirección, aumenta nuevamente hasta el valor máximo y decrece de nuevo hasta cero. Durante el movimiento ulterior del conductor las variaciones de la f.e.m. se repetirán.

Para representar claramente la variación de la f.e.m. inducida en el conductor, aprovechamos el método gráfico. Tracemos dos ejes recíprocamente perpendiculares (fig. 126,*b*). En el eje horizontal marquemos a escala los ángulos de giro del conductor, y en el vertical, con otra escala, la magnitud de la f.e.m. inducida en el conductor en función del tiempo. Si la f.e.m. inducida en el conductor al pasar por debajo del polo sur la consideramos positiva y marcamos

Tabla 16

Magnitud y dirección de la f.e.m. en función de la posición del conductor

Posición del conductor	Angulo α entre los vectores de inducción B y velocidad v	Sen α	Dirección de la f.e.m. en el conductor
1	0	0	—
2	45	0,707	hacia nosotros
3	90	1	Idem
4	135	0,707	Idem
5	180	0	—
6	225	−0,707	desde nosotros
7	270	−1	Idem
8	315	−0,707	Idem
9 ó 1	360	0	—

desde el eje horizontal hacia arriba, la f.e.m. inducida en el conductor al pasar por debajo del polo norte se debe considerar negativa y habrá que marcarla desde el eje horizontal hacia abajo. Trazando después, a través de los segmentos que representan los valores de las f. e. m., una línea continua, obtendremos una curva denominada s i n u s o i d e. Por medio de esta curva podemos fácilmente determinar la magnitud de la f.e.m. en cualquier momento de tiempo. Para eso marcamos en el eje horizontal el ángulo de giro del conductor que nos interesa, desde la posición inicial. Después, trazamos una perpendicular desde este punto. El segmento, comprendido entre los puntos de interseccción de la perpendicular con la curva y el eje horizontal, expresará a escala la magnitud de la f.e.m. inducida en el conductor en el momento dado de tiempo.

En nuestro ejemplo el conductor gira en un campo magnético homogéneo. En el conductor se induce una f.e.m. que varía según la ley sinusoidal. Tal f.e.m. se llama s i n u s o i d a l.

En adelante veremos que la electrotecnia prefiere utilizar magnitudes variables que cambian según la ley sinusoidal.

El dispositivo expuesto en la fig. 127 permite tomar y derivar a la red exterior una f.e.m. alterna. El conductor en forma de cuadro rectangular gira en el campo magnético bajo la acción de una fuerza ajena. Los extremos del cuadro están unidos a dos anillos de cobre 3 y 4, sobre los cuales van puestas dos escobillas de carbón 5 y 6. Por la red exterior pasará una corriente que varía en magnitud y en dirección. Tal corriente se llama a l t e r n a, diferenciándose de la continua que producen las pilas eléctricas y acumuladores. La corriente alterna se designa en los esquemas eléctricos con el siguiente símbolo convencional ~.

En la creación de la f.e.m. inducida no participarán todos los lados del cuadro, sino solamente los que intersecan las líneas magnéticas. Estos lados se denominan l a d o s a c t i v o s (en la fig. 127 están designados con las cifras 1 y 2).

La estructura del alternador expuesta en la fig. 127 prácticamente no puede ser utilizada. Su defecto consiste en la dificultad de crear un campo magnético homogéneo y en la gran reluctancia al flujomagnético el cual recorre por el aire gran parte de su camino.

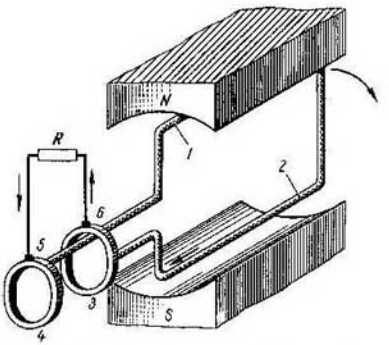


Fig. 127. Dispositivo para derivar la corriente alterna del rotor de un alternador

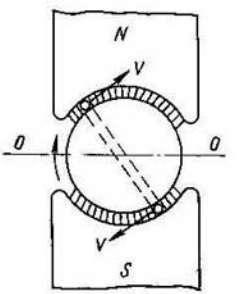


Fig. 128. Flujo magnético de una máquina con un tambor de acero

En las máquinas eléctricas modernas entre los polos del electroimán se aloja un tambor de acero (rotor) en cuyas ranuras se colocan los conductores del devanado. El dibujo de semejante máquina está representado en la fig. 128. En este caso las líneas magnéticas tienen que pasar por el aire un corto tramo entre el acero de los polos y del rotor. Se puede demostrar, que las líneas magnéticas, pasando por el entrehierro, entrarán en el rotor en dirección radial y en la misma dirección saldrán del mismo para llegar al otro polo. En este caso la dirección de la velocidad circunferencial es perpendicular en cada momento a la de las líneas magnéticas, es decir, que la velocidad siempre será normal ($v = v_n$).

El deseo de obtener una f.e.m. sinusoidal obliga a los diseñadores de la máquina a dar tal forma a los terminales polares, que la inducción magnética en el entrehierro varíe según la ley sinusoidal

$$B = B_m \operatorname{sen} \alpha,$$

donde B_m es la inducción magnética máxima en el entrehierro,

siendo $\alpha = 90°$, o sea

$$B = B_m \operatorname{sen} \alpha = B_m \operatorname{sen} 90° = B_m.$$

En este momento la f.e.m. inducida en el conductor también tiene el valor máximo:

$$e = B_m l v = E_m,$$

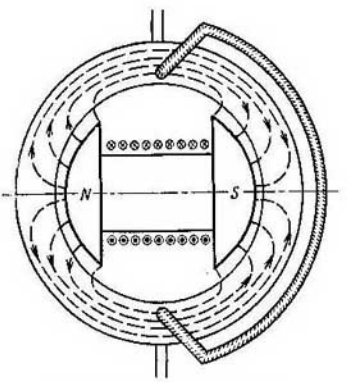
de donde la expresión general para la f.e.m. en el conductor será:

$$e = E_m \operatorname{sen} \alpha,$$

o bien,

$$e = \operatorname{sen} \alpha.$$

Para obtener una f.e.m. inducida en un alternador, es indiferente si el conductor móvil atraviesa un campo magnético inmóvil, o bien un campo móvil interseca un conductor fijo. En los tipos de alternadores ya vistos, el devanado donde se inducía la f.e.m. alterna se disponía sobre la parte giratoria de la máquina: el rotor; y los polos eran situados en la parte fija de la misma: el estator.



Aig. 129. Alternador bipolar

Sin embargo, para situar el devanado de corriente alterna en condiciones más favorables, éste se dispone con frecuencia sobre el estator, mientras que el devanado de excitación se coloca sobre el rotor. Un alternador semejante está representado en la fig. 129.

La corriente continua, necesaria para el devanado inductor, se suministra de un generador excitador especial de corriente continua, asentado sobre el mismo árbol del alternador, o de un dispositivo rectificador.

§ 80. Nociones y definiciones principales acerca de la corriente alterna

Analizando el proceso para obtener la corriente alterna, nos hemos convencido de que la f.e.m. alterna y la corriente alterna cambian periódicamente su dirección y magnitud. El valor en un momento dado de una magnitud variable (corriente, tensión y f.e.m.) se llama **valor instantáneo** y se designa con una letra minúscula (i, corriente, u, tensión, e, f.e.m.).

El máximo de los valores instantáneos de una magnitud variable se llama **valor máximo o de amplitud**, y se representa con letra mayúscula y el índice m, por ejemplo, I_m, E_m, U_m. El tiempo durante el cual los cambios de una magnitud variable (f.e.m., tensión o corriente) se repiten, se llama **ciclo** y tiene el símbolo T. El ciclo se mide en segundos. El número de ciclos en la unidad de tiempo (en un segundo) se llama **frecuencia** de la corriente alterna y se designa con la letra f. La unidad de frecuencia es un hertzio (Hz, c/s). 1 hertzio es igual a 1 ciclo por segundo.

En la técnica se emplean corrientes alternas de diferentes frecuencias. La frecuencia standard de corriente en la URSS es de 50 c/s. Para hornos eléctricos de alta frecuencia se emplean corrientes alternas con frecuencia de varios miles y decenas de miles de hertzios (100, 2.500 y 8.000 Hz, de alternadores mecánicos; y 150-250 kHz de alternadores de válvula). Para el calentamiento dieléctrico de masas plásticas, madera, vidrio, productos alimenticios y de otros materiales semiconductores y dieléctricos se utilizan instalaciones de alta frecuencia de 20 a 25 MHz.

En las líneas de comunicación telefónica se emplean corrientes con frecuencia de centenares y millares de hertzios. Corrientes con frecuencia de millones y miles de millones de hertzios se emplean en la radiotecnia.

La frecuencia de la corriente alterna se mide mediante instrumentos que se denominan frecuencímetros.

Entre el ciclo y la frecuencia existe la siguiente relación:

$$T = \frac{1}{f}; \qquad f = \frac{1}{T}.$$

Ejemplo 1. Determinar el ciclo de una corriente, si su frecuencia es igual a 50 c/s.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0{,}02 \text{ seg.}$$

Ejemplo 2. Hallar la frecuencia de una corriente, si el ciclo es igual a $5 \cdot 10^{-8}$ seg.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-8}} = 20 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 20 \cdot 10^3 \text{ kHz} = 20 \text{ MHz}.$$

§ 81. Magnitudes sinusoidales variables

En la práctica se han elegido las oscilaciones sinusoidales de las magnitudes eléctricas variables. En lo sucesivo, tratando sobre la corriente, f.e.m., tensión y flujo magnético, consideraremos que éstos varían según la ley sinusoidal.

Supongamos que tenemos el vector OA (fig. 130) que expresa, a escala, cierta magnitud sinusoidal variable, por ejemplo, la corriente. Hagamos girar con velocidad constante el vector alrededor

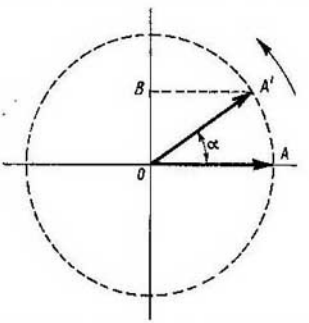


Fig. 130. Giro de un vector alrededor del eje

del punto O en sentido contrario al de las manecillas del reloj. El extremo del vector trazará una circunferencia, y el ángulo de giro del vector variará con el tiempo.

La velocidad angular o la frecuencia angular ω (omega) de rotación es igual al ángulo de giro del vector en la unidad de tiempo.

$$\omega = \frac{\alpha}{t},$$

de donde

$$\alpha = \omega t.$$

A menudo en vez del grado se utiliza otra unidad de medición del ángulo, el radián. El radián es un ángulo cuyo arco es igual al radio. Si la longitud de una circunferencia $C = 2\pi r$, ésta contiene $\frac{2\pi r}{r} = 2\pi$ radianes.

En una vuelta el radio vector OA tendrá un ciclo de rotación con duración de T segundos.

En este caso la frecuencia angular se expresará:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T}\ \frac{\text{rad}}{\text{seg}}.$$

Puesto que $\frac{1}{T} = f$, entonces $\omega = 2\pi f \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$.

El ángulo de giro del radio vector α desde la posición inicial será igual a:

$$\alpha = \omega t = 2\pi f t.$$

El ángulo α se llama á n g u l o d e f a s e o f a s e.

La proyección del vector OA sobre el diámetro vertical es igual al producto de la magnitud del vector por el seno del ángulo de fase, o sea,

$$OB = OA \operatorname{sen} \alpha$$

De este modo, la proyección del vector giratorio OA sobre el diámetro vertical varía según la ley sinusoidal. Si la longitud del vector es A_m, el valor instantáneo de la magnitud de la proyección a es igual a:

$$a = A_m \operatorname{sen} \alpha = A_m \operatorname{sen} \omega t;$$

$$\text{si } \alpha = 0°, \quad a = A_m \operatorname{sen} 0° = 0;$$

$$\text{si } \alpha = 90°, \quad a = A_m \operatorname{sen} 90° = A_m.$$

En el último caso, el valor instantáneo de la magnitud de la proyección es igual a su valor de amplitud o máximo.

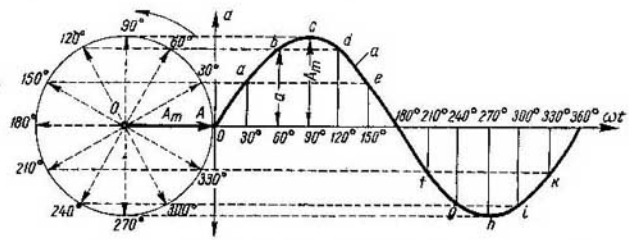


Fig. 131. Obtención de la sinusoide haciendo girar un vector

Conociendoel valor del ángulo de fase y proyectando el vector A_m sobre el diámetro vertical, obtendremos el valor instantáneo de la magnitud sinusoidal.

Tracemos un eje horizontal en el cual marcamos los ángulos de fase que recorre el vector durante su giro (fig. 131). Después marcamos los segmentos verticales iguales a los valores instantáneos de la magnitud en los puntos donde terminan los segmentos horizontales que corresponden a los ángulos de fase. Uniendo los extremos de los segmentos verticales con una curva suave obtendremos la sinusoide que ya conocemos.

La sinusoide fue obtenida como resultado de la rotación del vector, que expresaba a escala el valor máximo de la magnitud

sinusoidal variable. El modo de representar magnitudes que varían en el tiempo de manera sinusoidal, por medio de vectores de determinada longitud y situados entre sí de forma conveniente, se llama d i a g r a m a v e c t o r i a l.

La misma dependencia puede ser expresada gráficamente en forma de curvas sinusoidales.

De este modo, una magnitud sinusoidal variable puede ser representada de tres modos: mediante una ecuación, un diagrama vectorial y una gráfica.

Si el radio vector en el momento inicial de tiempo ($t = 0$) forma cierto ángulo ψ con el eje horizontal, el valor instantáneo de la magnitud variable en este caso será:

$$a = A_m \operatorname{sen} (\omega t + \psi).$$

El ángulo ψ (psi) se llama á n g u l o i n i c i a l d e f a s e o f a s e i n i c i a l.

El diagrama vectorial y la gráfica para este caso se dan en la fig. 132.

No se modificará nada si hacemos girar dos vectores que coinciden en dirección. En un momento determinado, ambos vectores girarán en un mismo ángulo de fase. Por eso, tanto los vectores mismos, como las magnitudes variables que ellos expresan se llaman coincidentes en fase. El diagrama vectorial y el gráfico de dos magnitudes que coinciden en fase se muestran en la fig. 133.

Las ecuaciones de estas magnitudes se escribirán así:

$$a_1 = A_{1m} \operatorname{sen} \omega t;$$

$$a_2 = A_{2m} \operatorname{sen} \omega t.$$

Si desplazamos los vectores uno respecto a otro en un determinado ángulo φ y los hacemos girar alrededor del punto O, obtendremos dos sinusoides desfasadas entre sí en el mismo ángulo φ. En la fig. 134 se muestra el trazado de dos sinusoides desfasadas en un ángulo φ, igual a 90°. En este caso se dice que la curva a_1 adelanta en fase 90° la curva a_2, o, al contrario, la curva a_2 se retrasa en fase 90° de la curva a_1.

Durante el estudio de los fenómenos en los circuitos de corriente alterna tendremos frecuentemente que sumar y restar magnitudes sinusoidales (corrientes, tensiones, etc.).

Vamos a estudiar la suma de dos magnitudes sinusoidales, expresadas por las ecuaciones:

$$a_1 = A_{1m} \operatorname{sen} (\omega t + \psi_1);$$

$$a_2 = A_{2m} \operatorname{sen} (\omega t + \psi_2).$$

Su suma tendrá el valor

$$a = a_1 + a_2 = A_{1m} \operatorname{sen} (\omega t + \psi_1) + A_{2m} \operatorname{sen} (\omega t + \psi_2).$$

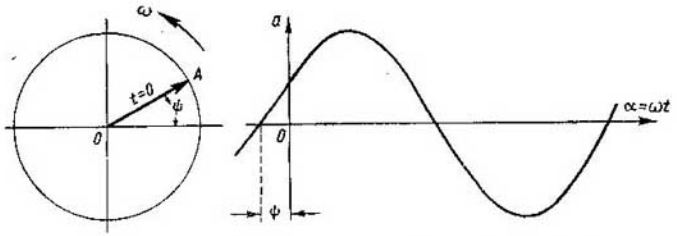


Fig. 132. Trazado de la sinusoide existiendo la fase inicial

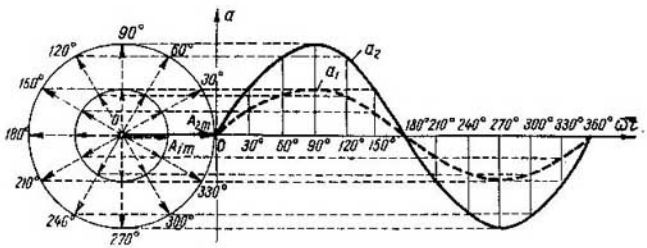


Fig. 133. Trazado de dos sinusoides haciendo girar dos vectores coincidentes

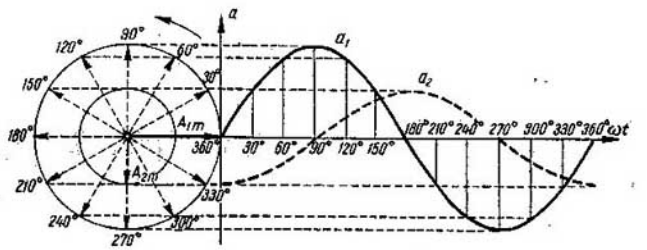


Fig. 134. Trazado de dos sinusoides desfasadas 90°, haciendo girar dos vectores dispuestos a 90°

Después de realizar las operaciones matemáticas necesarias, obtendremos definitivamente:

$$a = A_m \operatorname{sen}(\omega t + \psi).$$

De aquí se ve que la suma de dos sinusoides de igual ciclo es también una sinusoide con amplitud A_m y fase inicial ψ.

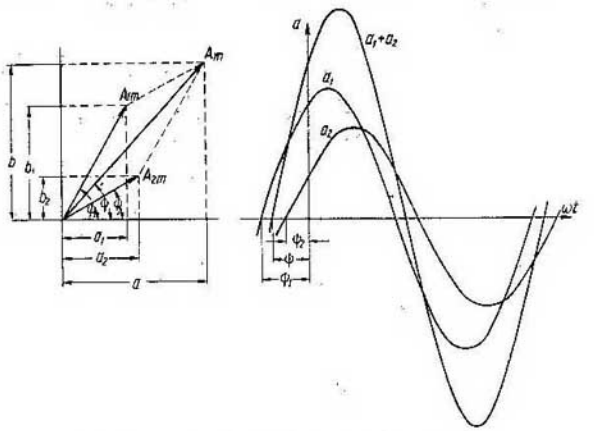


Fig. 135. Suma de dos magnitudes sinusoidales

Más fácil es representar la suma de magnitudes sinusoidales en un diagrama vectorial expuesto en la fig. 135, a la izquierda. Del diagrama se deduce:

$$a_1 = A_{1m} \cos \psi_1;$$
$$a_2 = A_{2m} \cos \psi_2;$$
$$a = a_1 + a_2;$$
$$b_1 = A_{1m} \cdot \operatorname{sen} \psi_1;$$
$$b_2 = A_{2m} \cdot \operatorname{sen} \psi_2;$$
$$b = b_1 + b_2.$$

La magnitud del vector resultante A_m, igual a la suma geométrica de los vectores A_{1m} y A_{2m}, es igual a:

$$A = \sqrt{a^2 + b^2};$$
$$\operatorname{tg} \psi = \frac{b}{a}.$$

En la fig. 135, a la derecha, se da la suma gráfica de dos magnitudes sinusoidales. Todo valor instantáneo de la sinusoide resultante es igual a la suma de valores instantáneos de las sinusoides que se suman, para cada momento de tiempo.

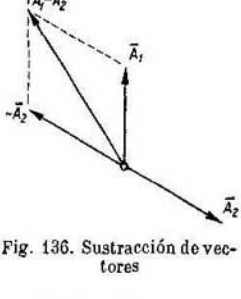


Fig. 136. Sustracción de vectores

Las conclusiones obtenidas se pueden aplicar para sumar tres y más magnitudes sinusoidales.

Para distinguir las operaciones con vectores de las operaciones con magnitudes escalares, en lo sucesivo pondremos una raya por encima de las representaciones en letras del vector. Por ejemplo, la suma de dos vectores A_1 y A_2 la escribiremos así:

$$\bar{A} = \bar{A}_1 + \bar{A}_2.$$

Vamos a examinar ahora, cómo se realiza la sustracción de las magnitudes vectoriales. Supongamos que los vectores A_1 y A_2 representan ciertas magnitudes sinusoidales y es necesario restar del vector $\bar{A}_1$ el vector $\bar{A}_2$ (fig. 136). La sustracción de vectores se puede siempre sustituir por la suma del vector minuendo con un vector igual y opuesto al que se sustrae, o sea

$$\bar{A}_1 - \bar{A}_2 = \bar{A}_1 + (-\bar{A}_2).$$

§ 82. Frecuencia de la corriente alterna de un generador en función del número de pares de polos y de la velocidad de rotación del rotor

Al estudiar la obtención de una corriente alterna se ve que durante una vuelta del rotor la f.e.m., inducida en los conductores del devanado del alternador, realiza un ciclo. Si el rotor da, por ejemplo, 5 r.p.s., la f.e.m. tendrá 5 c/s, o la frecuencia de corriente del alternador será igual a 5 hertzios. Por consiguiente, el número de revoluciones por segundo del rotor del alternador es igual numéricamente a la frecuencia de la corriente.

La frecuencia de la corriente f se expresa con la siguiente relación:

$$f = \frac{n}{60},$$

donde n = número de revoluciones por minuto del rotor.

Para obtener la frecuencia standard de corriente, 50 Hz, del generador, el rotor ha de hacer 3.000 r.p.m., es decir,

$$f = \frac{n}{60} = \frac{3.000}{60} = 50 \text{ Hz}.$$

Sin embargo, nuestras consideraciones son justas sólo para un generador bipolar, es decir, para una máquina con un par de polos p.

Si la máquina es tetrapolar, es decir, el número de pares de polos es igual a dos ($p = 2$; fig. 137), el ciclo completo de variación de la corriente tendrá lugar durante una media vuelta del rotor (posiciones 1-5 del conductor en el dibujo). En la segunda media vuelta del rotor la corriente tendrá un ciclo más. Por consiguiente, en una

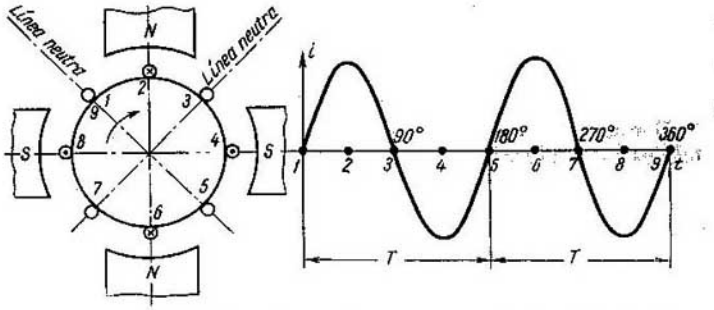


Fig. 137. Variación de la corriente alterna en un conductor del rotor de un alternador tetrapolar

vuelta del rotor de una máquina tetrapolar, la corriente en el conductor tiene dos ciclos. En una máquina de 6 polos ($p = 3$), la corriente en el conductor tendrá tres ciclos durante una vuelta del rotor.

De este modo, para las máquinas que tienen p pares de polos, la frecuencia de corriente, siendo n/60 r.p.s., será p veces mayor que para una máquina bipolar, o sea,

$$f = \frac{pn}{60}.$$

Entonces, la fórmula para determinar la velocidad de rotación del rotor tendrá la siguiente forma:

$$n = \frac{60f}{p}.$$

Ejemplo 3. Determinar la frecuencia de la corriente alterna obtenida de un generador con ocho polos ($p = 4$), la velocidad de rotación del rotor $n = 750$ r.p.m. Sustituyendo en la fórmula los valores de p y n, para determinar la frecuencia de corriente, obtendremos:

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{4 \cdot 750}{60} = 50 \text{ Hz}.$$

Ejemplo 4. Determinar la velocidad de rotación del rotor de un generador de 20 polos ($p = 10$), si el frecuencímetro indicó $f = 25$ Hz. Sustituyendo en

la fórmula los valores de p y f, para determinar el número de revoluciones del rotor n, obtendremos:

$$n = \frac{f60}{p} = \frac{25 \cdot 60}{10} = 150 \text{ r.p.m.}$$

Ejemplo 5. El rotor del generador, accionado por una turbina hidráulica da 75 r.p.m. Determinar el número de polos del alternador, si la frecuencia de su corriente es de 50 Hz.

$$p = \frac{f60}{n} = \frac{50 \cdot 60}{75} = 40 \text{ pares.}$$

Por consiguiente, el alternador tiene 80 polos.

§ 83. Valor eficaz de la corriente alterna

Durante un ciclo, la corriente alterna sinusoidal tiene diferentes valores instantáneos. Naturalmente, surge la pregunta: ¿qué valor de la corriente indica el amperímetro, intercalado en el circuito? Los efectos de la corriente no se determinan ni por valores de amplitud, ni por los instantáneos. Para apreciar el efecto de la corriente alterna, vamos a compararlo con el efecto térmico de la corriente continua.

La potencia P de la corriente continua I que pasa a través de la resistencia R será:

$$P = I^2 R.$$

La potencia de la corriente alterna se expresará como efecto medio de la potencia instantánea i^2R durante un ciclo completo o valor medio de $(I_m \times \text{sen } \omega t)^2 \cdot R$ durante el mismo período.

Supongamos que el valor medio i^2 durante un ciclo sea M. Igualando la potencia de la corriente continua a la de la corriente alterna, tenemos:

$$I^2 R = MR,$$

de donde

$$I = \sqrt{M}.$$

La magnitud I se llama valor eficaz de la corriente alterna.

El valor medio i^2 para la corriente alterna se determina del modo siguiente: tracemos una curva sinusoidal de variación de corriente (fig. 138). Elevando al cuadrado cada valor instantáneo de la corriente, obtendremos la curva i^2 en función del tiempo. Ambas mitades de esta curva se encuentran por arriba del eje horizontal, ya que los valores negativos de la corriente ($-i$) en la segunda alternancia, siendo elevados al cuadrado, dan magnitudes positivas. Construyamos un rectángulo con base T y un área igual a la limitada por la curva i^2 y el eje horizontal. La altura del rectángulo M corresponderá al valor medio de i^2 durante un ciclo. Este valor obtenido durante el ciclo, calculado matemáticamente, será igual a $\frac{1}{2} I_m^2$.

Por consiguiente,

$$M = \frac{1}{2} I_m^2.$$

Puesto que el valor eficaz I de la corriente alterna es igual a $\sqrt{M}$, definitivamente tenemos

$$I = \sqrt{M} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

De modo análogo, la dependencia entre los valores eficaz y de amplitud para la tensión U y E tiene la forma:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Los valores eficaces de las magnitudes variables se designan con letras mayúsculas sin índices (I, U, E).

Basándose en lo expuesto más arriba, se puede decir, que el valor eficaz de la corriente alterna es igual al de la corriente continua,

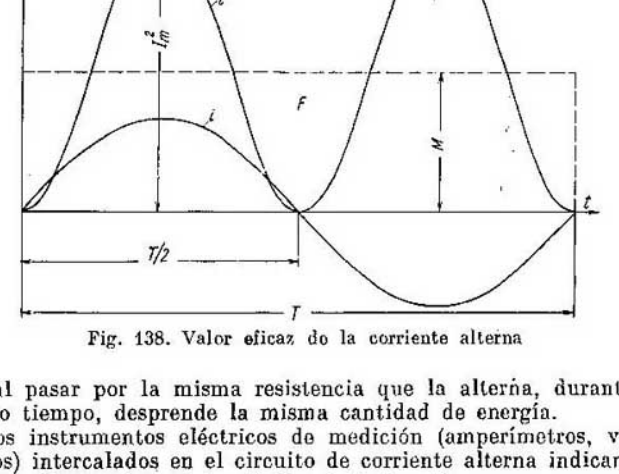


Fig. 138. Valor eficaz de la corriente alterna

que al pasar por la misma resistencia que la alterna, durante el mismo tiempo, desprende la misma cantidad de energía.

Los instrumentos eléctricos de medición (amperímetros, voltímetros) intercalados en el circuito de corriente alterna indican los valores eficaces de la intensidad o de la tensión.

Al trazar diagramas vectoriales, es más cómodo marcar no los valores de amplitud, sino los valores eficaces de los vectores. Para eso, las longitudes de los vectores se reducen en $\sqrt{2}$ veces. En este caso la disposición de los vectores en el diagrama no cambia.

§ 84. Valor medio de la corriente alterna

El valor medio de la magnitud sinusoidal variable durante un ciclo es igual a cero. Por eso, cuando se habla del valor medio de la magnitud sinusoidal, se tiene en cuenta el valor medio durante una alternancia. En la fig. 139 está representada la curva de variación de la corriente alterna durante una alternancia.

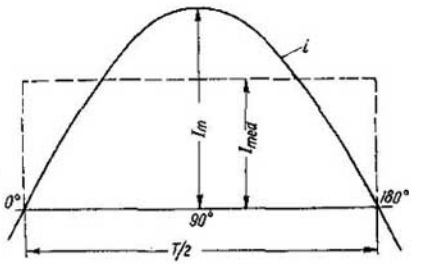


Fig. 139. Valor medio de la corriente alterna

Tracemos un rectángulo con base T/2 y área igual a la comprendida entre la curva y el eje horizontal. La altura del rectángulo representará el valor medio de la corriente en una alternancia.

La función entre los valores de amplitud y medio de la corriente alterna sinusoidal es:

$$I_{med} = \frac{2}{\pi} I_m = 0{,}637 I_m.$$

La misma relación existe entre los valores medio y de amplitud de la tensión y de la f.e.m.

$$U_{med} = 0{,}637 U_m; \quad E_{med} = 0{,}637 E_m.$$

La relación entre el valor eficaz de la magnitud variable y su valor medio se llama **coeficiente de forma de la curva** y tiene el símbolo k_φ.

Para las magnitudes sinusoidales este coeficiente es igual a:

$$k_\varphi = \frac{I}{I_{med}} = \frac{I_m \pi}{\sqrt{2} \cdot 2 I_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}11.$$

La relación entre el valor de amplitud de la magnitud alterna y su valor eficaz se llama **coeficiente de amplitud** y se designa con la letra k_a.

Para las magnitudes sinusoidales este coeficiente es igual a:

$$k_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2} = 1{,}41.$$

§ 85. Circuito de corriente alterna con resistencia activa

Estudiemos un circuito (fig. 140) que consta de la resistencia R. Para mayor sencillez no tomemos en consideración la influencia de la inductancia y de la capacidad. En los bornes del circuito está aplicada la tensión sinusoidal

$$u = U_m \operatorname{sen} \omega t.$$

Según la ley de Ohm el valor instantáneo de la corriente será igual a:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \operatorname{sen} \omega t = I_m \operatorname{sen} \omega t$$

donde

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

o, pasando a los valores eficaces obtenemos:

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}R},$$

y

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

Como se deduce de la última expresión, la forma de la ley de Ohm para un circuito de corriente alterna que contiene una resistencia es la misma que para un circuito de corriente continua. Además,

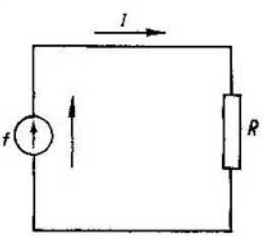


Fig. 140. Circuito con resistencia activa

de la ley de Ohm se ve la proporcionalidad entre el valor instantáneo de la tensión y el de la corriente. De esto se deduce que, en un circuito de corriente alterna que tiene resistencia R, la tensión y la corriente coinciden en fase. En la fig. 141 se dan las curvas de tensión y de corriente y el diagrama vectorial para el circuito que estudiamos; las longitudes de los vectores designan los valores eficaces de la tensión y de la corriente. La resistencia de los conductores a la corriente alterna es algo mayor que su resistencia a la corriente

continua. Esto se explica por el efecto pelicular cuya esencia está expuesta en el § 87. Débido a esto la resistencia de los conductores a la corriente alterna se llama a c t i v a. Se designa también con la letra R.

En el circuito presentado en la fig. 140 la tensión exterior aplicada se compensa por la caída de tensión, en la resistencia R, que se llama caída activa de tensión y se designa con U_a:

$$U_a = IR.$$

El valor instantáneo de la potencia, en el circuito que se estudia, es igual al producto de los valores instantáneos de la tensión por los de la corriente:

$$p = ui.$$

En la fig. 142 se muestra la curva de la potencia instantánea durante un ciclo. En el dibujo se ve que la potencia no es una magnitud constante, puesto que tiene pulsaciones con frecuencia doble *).

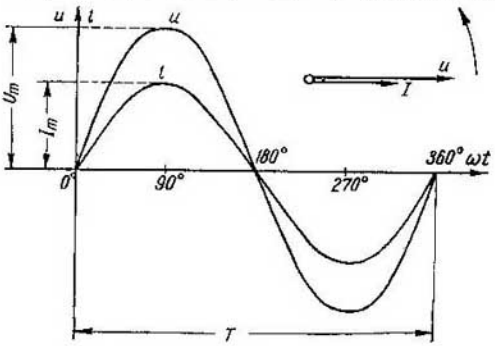


Fig. 141. Gráfica y diagrama vectorial para un circuito de corriente alterna con resistencia activa

El valor medio de la potencia durante un ciclo o simplemente la potencia media se designa con la letra P y puedo ser determinada por la fórmula cuya demostración no exponemos:

$$P = UI \cos \varphi,$$

donde φ es el ángulo de desfasamiento entre la tensión y la corriente.

La potencia media se llama también potencia activa. La fórmula citada de la potencia activa es justa para todo circuito de corriente alterna.

* Pulsación es la variación del valor numérico de la magnitud, siendo constante su signo.

Para un circuito con resistencia activa, la tensión y la corriente coinciden en fase. Por eso el ángulo φ es igual a cero y $\cos \varphi = 1$. Para la potencia activa obtendremos:

$$P = UI$$

o bien,

$$P = I^2R,$$

es decir, la fórmula de la potencia para un circuito de corriente alterna con resistencia activa es la misma que para un circuito de corriente continua. Todos los conductores disponen de una resistencia activa. En los circuitos de corriente alterna la resistencia activa

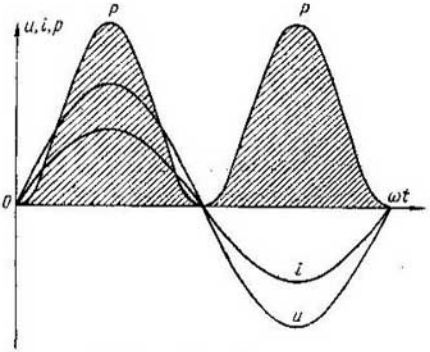


Fig. 142. Curva de potencia instantánea de un circuito con resistencia activa

prácticamente sólo la tienen los filamentos de las lámparas de incandescencia, resistencias de los aparatos eléctricos calentadores y de los reóstatos, lámparas de arco, devanados bifilares especiales y conductores rectilíneos cortos.

§ 86. Circuito de corriente alterna con inductancia

Como hemos visto, al cerrar, abrir y variar de cualquier modo la corriente en el circuito eléctrico, surge en el conductor una f.e.m. inducida debido a la intersección del mismo por su propio campo magnético. Esta f.e.m. ha sido denominada f.e.m. de autoinducción. La f.e.m. de autoinducción tiene un carácter reactivo. Así, por ejemplo, al aumentar la corriente en el circuito, la f.e.m. de autoinducción será contraria a la del generador de tensión y por eso, la corriente en el circuito eléctrico no puede establecerse en seguida. Y al contrario, al disminuir la corriente, en el circuito se induce una f.e.m. de autoinducción con una dirección que impide que la corriente desaparezca, es decir, la sostiene.

Como ya sabemos, la f.e.m. de autoinducción depende de la velocidad de variación de la corriente en el circuito y de la inductancia de este circuito (del número de espiras, presencia de núcleos de acero).

$$e_L = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

En un circuito de corriente alterna la f.e.m. de autoinducción surge ininterrumpidamente, ya que la corriente en el circuito varía también sin interrupción.

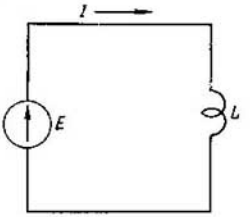


Fig. 143. Circuito de corriente alterna con inductancia

En la fig. 143 está representado el esquema de un circuito de corriente alterna con bobina de inductancia L sin núcleo de acero. Para simplificar, vamos a considerar primeramente que la resistencia activa de la bobina es muy pequeña y se puede despreciar.

Estudiemos más detalladamente los cambios de la corriente alterna durante un ciclo. En la fig. 144 se muestra la curva de variación de la corriente alterna. La primera alternancia está dividida en pequeñas partes iguales.

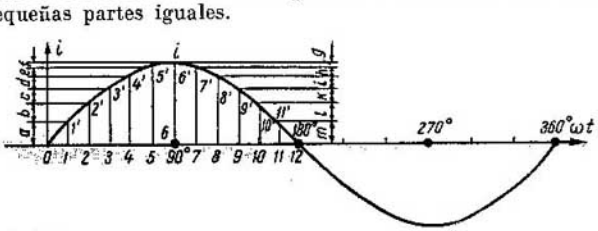


Fig. 144. Determinación de la velocidad de variación de la corriente alterna

Durante un período de tiempo 0—1, la magnitud de la corriente cambia de cero a 1—1'. El incremento de la magnitud de la corriente durante este período es igual a a.

Durante el período designado con el segmento 1—2, la magnitud instantánea de la corriente crece hasta 2—2', y el incremento de la magnitud de la corriente es igual a b.

Durante el período designado con el segmento 2—3 la corriente aumenta hasta 3—3′, y el incremento de la corriente lo constituye el segmento *c*, etc.

De este modo, con el tiempo la corriente alterna crece hasta el máximo (90°). Pero, como se ve en el dibujo, el incremento de la corriente se hace cada vez menor, hasta que al fin, habiendo llegado la corriente al máximo, el incremento se hace nulo.

Si la corriente sigue variando desde su valor máximo hasta cero, la disminución de la magnitud de la corriente se hace cada vez

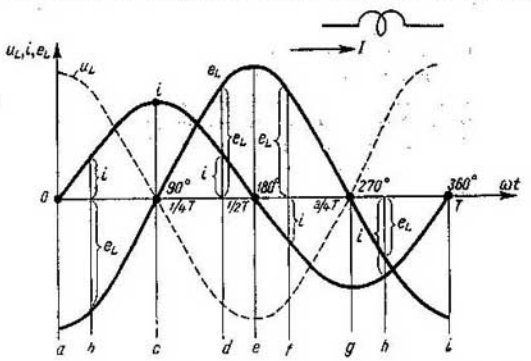


Fig. 145. F.e.m. de autoinducción en una bobina conectada al circuito de corriente alterna

mayor, hasta que al fin, la corriente, variando con máxima velocidad junto a su valor cero, desaparece, pero en seguida surge de nuevo pasando en dirección contraria.

Al examinar la variación de la corriente durante un ciclo, vemos que ésta varía con velocidad máxima cerca de sus valores nulos. Cerca de los valores máximos la velocidad de variación de la corriente decae, y cuando la corriente alcanza su valor máximo, el incremento es nulo. De este modo, la corriente alterna varía no sólo en magnitud y dirección, sino también en la velocidad de su variación. La corriente alterna, al pasar por las espiras de la bobina, crea un campo magnético variable. Las líneas magnéticas de este campo, atravesando las espiras de su bobina, inducen en éstas una f.e.m. de autoinducción.

En la fig. 145 la curva *i* muestra la variación de la corriente alterna en la bobina. Como ya ha sido indicado, la magnitud de la f.e.m. de autoinducción depende de la velocidad de variación de la corriente y de la inductancia de la bobina. Pero ya que la inductancia de la bobina en nuestro caso queda invariable, la f.e.m. de autoinducción dependerá sólo de la velocidad de variación de la corriente.

Anteriormente se demostró que la velocidad máxima de variación de la corriente tiene lugar cerca de los valores nulos de la corriente. Por consiguiente, la f.e.m. de autoinducción tiene el valor máximo en estos mismos momentos.

En el momento *a* la corriente aumenta brusca y rápidamente desde cero, y por eso, como se deduce de la fórmula citada más arriba, la f.e.m. de autoinducción (curva e_L) tiene el valor máximo negativo. Puesto que la corriente crece, la f.e.m. de autoinducción, según la ley de Lenz, ha de impedir la variación (en este caso, el aumento) de la corriente. Por lo tanto, la f.e.m. de autoinducción, al crecer la corriente tendrá la dirección contraria a la corriente (posición *b*), lo que se deduce también de la fórmula mencionada. La velocidad de variación de la corriente disminuye a medida que ésta se acerca a su valor máximo. Por eso la f.e.m. de autoinducción también disminuye hasta que, al fin, al llegar la corriente a su valor máximo, cuando su variación es nula, se hace igual a cero (posición *c*).

La corriente alterna, después de alcanzar su valor máximo, empieza a decrecer. Según la ley de Lenz, la f.e.m. de autoinducción impedirá que la corriente decrezca y la sostendrá, ya que estará dirigida en el mismo sentido (posición *d*).

La corriente alterna, al seguir variando, disminuye rápidamente hasta llegar a cero. La disminución brusca de la corriente en la bobina trae consigo una reducción rápida del campo magnético, y, puesto que las líneas magnéticas intersecan las espiras de la bobina, en éstas se inducirá la f.e.m. de autoinducción máxima (posición *e*).

Durante la segunda alternancia de variación de la corriente, el cuadro se repite y, al aumentar la corriente, la f.e.m. de autoinducción se opondrá de nuevo teniendo la dirección contraria a la de la corriente (posición *f*).

Al ir disminuyendo la corriente, la f.e.m. de autoinducción, teniendo la misma dirección que la corriente, la sostendrá no permitiéndole desaparecer en seguida (posición *h*).

En el dibujo se ve que la f.e.m. de autoinducción está atrasada en fase de la corriente 90° o en 1/4 de ciclo. Puesto que el flujo magnético está en fase con la corriente, se puede decir, que la f.e.m. que se induce por el flujo magnético está atrasada 90° o en 1/4 de ciclo en comparación con éste.

Sabemos ya que dos sinusoides desfasadas 90°, pueden ser representadas con vectores dispuestos a 90° (fig. 146).

Puesto que la f.e.m. de autoinducción, en los circuitos de corriente alterna, se opone ininterrumpidamente a las variaciones de la corriente, para ofrecer la posibilidad a la corriente de pasar por las espiras de la bobina, la tensión de la red debe compensar la f.e.m. de autoinducción. En otras palabras, la tensión de la red en cada momento de tiempo ha de ser igual y opuesta a la f.e.m. de autoinducción.

Designemos con U (fig. 147) el vector de tensión de la red igual y contrario a la f.e.m. de autoinducción E_L. Sólo observando la condición de que a los bornes de la bobina sea aplicada una tensión de la red igual y contraria a la f. e. m. de autoinducción, y, por

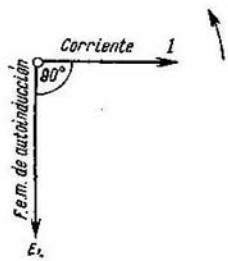


Fig. 146. La corriente en la bobina adelanta en fase 90° a la f.e.m. de autoinducción

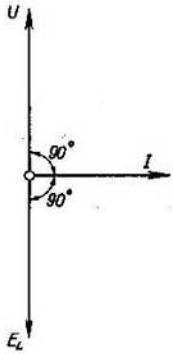


Fig. 147. La tensión de la red aplicada a la bobina adelanta 90° a la corriente y es contraria a la f. e. m. de autoinducción

consiguiente, esta tensión U de la red compense la f.e.m. de autoinducción E_L, por la bobina podrá fluir la corriente alterna I.

Pero en este caso la tensión U de la red adelantará en fase 90° a la corriente I.

De este modo, en los circuitos de corriente alterna, la f.e.m. de autoinducción, al surgir ininterrumpidamente, provoca un desfasaje entre la corriente y la tensión. Volviendo a la fig. 145, vemos que la corriente i pasará por la bobina cuando la tensión de la red (curva u_L) sea igual a cero (posición c) e incluso cuando la tensión esté dirigida en sentido contrario a la corriente (posición d y h).

Por consiguiente, señalemos que, en el circuito de corriente alterna la tensión de la red y la corriente están en fase, cuando la f.e.m. de autoinducción es nula, mientras que una carga inductiva en los circuitos de corriente alterna (devanados de electromotores y alternadores, devanados de transformadores, bobinas de inducción) siempre origina un desfasaje entre la corriente y la tensión.

Se puede demostrar que la velocidad de variación de la corriente es proporcional a la frecuencia angular ω. Por consiguiente, el valor eficaz de la f.e.m. de autoinducción E_L puede ser hallado por la fórmula:

$$E_L = \omega LI = 2\pi fLI.$$

Como ha sido señalado más arriba, la tensión aplicada a los bornes del circuito que tiene inductancia debe ser en cada instante igual en magnitud a la f.e.m. de autoinducción:

$$U_L = E_L.$$

Por eso,

$$U_L = 2\pi f L I.$$

Designando

$$2\pi f L = x_L, \text{ obtendremos } U_L = x_L I.$$

La fórmula de la ley de Ohm para un circuito de corriente alterna con inductancia será:

$$I = \frac{U_L}{x_L}.$$

La magnitud x_L se llama **reactancia inductiva del circuito** y se mide en ohmios. Así que, la reactancia inductiva es un obstáculo peculiar que ofrece el circuito a las variaciones de la corriente en el mismo y es igual al producto de la inductancia por la frecuencia angular.

$$x_L = \omega L.$$

La reactancia inductiva del conductor depende de la frecuencia de la corriente alterna y de la inductancia del conductor. Por eso, la resistencia de una bobina que se conecta al circuito de corriente de diferente frecuencia será diversa. Por ejemplo, si se toma una bobina con inductancia de 0,05 H, en un circuito con corriente de 50 Hz su reactancia inductiva será:

$$x_{L_1} = 2\pi f_1 L = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}05 = 15{,}7\Omega,$$

y en un circuito con corriente de 400 Hz de frecuencia

$$x_{L_2} = 2\pi f_2 L = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 400 \cdot 0{,}05 = 125{,}6\Omega.$$

La parte de tensión de la red que va a compensar (equilibrar) la f.e.m. de autoinducción se denomina *caída inductiva de tensión y es una componente reactiva de tensión.*

$$U_L = x_L I.$$

Veamos ahora qué potencia se consume de un generador de corriente alterna si en sus bornes se encuentra conectada una bobina. En la fig. 148 se dan las curvas de los valores instantáneos de la tensión, corriente y potencia para este caso. El valor instantáneo de la potencia es igual al producto de los valores instantáneos de la tensión por los de la corriente:

$$p = ui.$$

En el dibujo se ve que si u e i tienen signos iguales, la curva p es positiva y se encuentra encima del eje ωt. Pero si u e i tienen signos diferentes, la curva p es negativa y se encuentra debajo del eje ωt.

En el primer cuarto del ciclo, la corriente y el flujo magnético de la bobina aumentan. La bobina consume de la red cierta potencia. El área comprendida entre la curva p y el eje ωt es el trabajo (energía) de la corriente eléctrica. Durante la primera cuarta parte del ciclo la energía que se toma de la red se utiliza para crear un campo magnético alrededor de las espiras de la bobina (potencia positiva). La

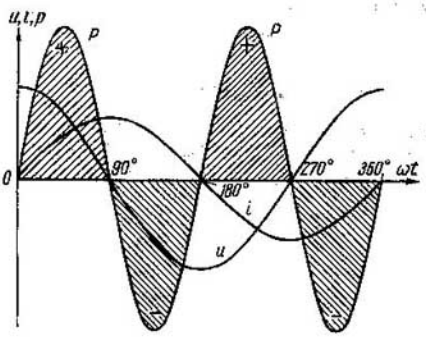


Fig. 148. Curvas de valores instantáneos de la tensión, corriente y potencia para un circuito con bobina de inductancia

cantidad de energía que se acumula en el campo magnético durante el crecimiento de la corriente se puede determinar por la fórmula:

$$A_m = \frac{LI_m^2}{2}.$$

En el segundo cuarto del ciclo, la corriente decae. La f.e.m. de autoinducción, que en el primer cuarto del ciclo trataba de impedir el aumento de la corriente, ahora, cuando la corriente empieza a disminuir, se opondrá a esta disminución. La bobina misma se convierte en una especie de generador de energía eléctrica, pues devuelve a la red la energía acumulada en su campo magnético. La potencia es negativa, y, en la fig. 148, la curva p se encuentra por debajo del eje ωt.

En la segunda alternancia el fenómeno se repite. De este modo, entre el generador de corriente alterna y la bobina de inductancia se produce un intercambio de potencia. Durante el primero y tercer cuarto del ciclo la potencia es absorbida por la bobina, durante el segundo y cuarto, la potencia se reintegra a la fuente.

En este caso, la potencia, en término medio, no se gastará, a pesar de que en los bornes del circuito existe la tensión U y por el circuito pasa la corriente I.

Llegamos al mismo resultado, si calculamos la potencia media o activa por la fórmula citada anteriormente:

$$P = UI \cos \varphi.$$

En nuestro caso entre la tensión y la corriente existe un desfasaje igual a 90°, y cos 90° = 0.

Por eso, la potencia activa es también igual a cero, es decir, el gasto de la potencia es nulo.

§ 87. Efecto pelicular

Este fenómeno consiste en lo siguiente. Como es sabido, el campo magnético de un conductor rectilíneo tiene forma de circunferencias concéntricas. El campo magnético se forma tanto en el interior del conductor, como en el espacio que rodea al mismo. Un conductor rectilíneo con corriente se puede dividir en hilos de corriente paralelos. Cuanto más cerca se encuentre un hilo del eje del conductor, tanto mayor es el flujo magnético, que se cierra en el interior del conductor, que lo envuelve. La inductancia del hilo de corriente y la reactancia inductiva son proporcionales al flujo magnético concatenado con éste. Por eso los hilos interiores del conductor por los cuales pasa corriente alterna tienen mayor reactancia inductiva que los exteriores, periféricos. Esto origina una distribución irregular de la corriente por la sección del conductor, de modo que la densidad de la corriente crecerá desde el eje hacia la superficie del conductor. Este fenómeno se denomina efecto pelicular. La distribución irregular de la densidad de corriente lleva al aumento de la resistencia del conductor. La resistencia del conductor a la corriente alterna, incluyendo el efecto pelicular, la hemos llamado resistencia activa a diferencia de la resistencia (óhmica) que opondría dicho conductor a la corriente continua.

El efecto pelicular se manifiesta débilmente si la frecuencia es de 50 Hz, la sección es pequeña y el conductor es de cobre. Siendo la frecuencia alta, la sección grande y el conductor de hierro, el efecto pelicular es considerable.

§ 88. Circuito de corriente alterna con capacidad (condensador)

Si intercalamos en el circuito de corriente continua un condensador ideal (sin pérdidas), transcurrido un plazo muy breve después de conectarlo, comienza a fluir por el circuito una corriente de carga. Después que el condensador se cargue hasta la tensión que corresponda a la de la fuente, la corriente temporal en el circuito se interrumpirá. Por consiguiente, para la corriente continua un condensador representa una interrupción del circuito o una resistencia infinitamente grande.

Pero si el condensador se intercala en un circuito de corriente alterna, aquél se cargará alternativamente en una y otra dirección.

Por el circuito pasará una corriente alterna. Examinemos este fenómeno más detalladamente.

En el momento de conectar, la tensión en el condensador es nula. Si conectamos el condensador a la tensión alterna de la red, durante el primer cuarto del ciclo, cuando la tensión de la red aumenta (fig. 149), el condensador se irá cargando.

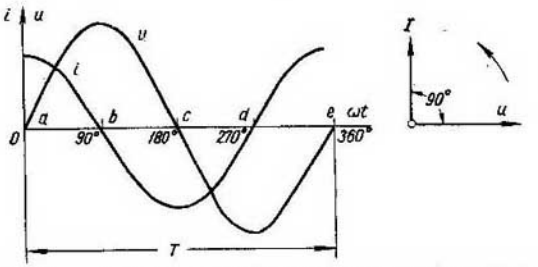


Fig. 149. Gráfica y diagrama vectorial para un circuito de corriente alterna con condensador

A medida que se acumulan las cargas en las armaduras del condensador, la tensión del mismo crece. Cuando la tensión de la red, al final del primer cuarto del ciclo, alcanza el máximo, cesa la carga del condensador y la corriente en el circuito se hace igual a cero.

La corriente en el circuito del condensador se puede determinar por la fórmula:

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

donde q = cantidad de electricidad que pasa por el circuito.

Por la electrostática sabemos que:

$$q = Cu_C = Cu,$$

donde C = capacidad (capacitancia) del condensador;
u = tensión de la red;
u_C = tensión en las armaduras del condensador.

Definitivamente para la corriente tenemos:

$$i = C\frac{\Delta u_C}{\Delta t} = C\frac{\Delta u}{\Delta t}.$$

De la última expresión se ve que cuando $\frac{\Delta u}{\Delta t}$ es máxima (posiciones a, c, e en la fig. 149), i es también máxima.

Cuando $\frac{\Delta u}{\Delta t} = 0$ (posiciones b, d), i es también igual a cero.

En el segundo cuarto del ciclo, la tensión de la red disminuirá y el condensador comenzará a descargarse. La corriente en el circuito invierte su dirección. En la siguiente alternancia la tensión de la red cambia su dirección, el condensador se vuelve a cargar y después se descarga de nuevo. En la fig. 149 se ve que la corriente en el circuito con capacidad adelanta en sus cambios la tensión en las armaduras del condensador $90° \left(\frac{\pi}{2}\right)$.

Comparando los diagramas vectoriales de los circuitos con inductancia y con capacidad, vemos que la inductancia y la capacidad influyen de modo opuesto en la fase.

Como ya hemos señalado, la velocidad de variación de la corriente es proporcional a la frecuencia angular ω. De la fórmula

$$i = C \frac{\Delta u}{\Delta t}$$

obtenemos análogamente, que la velocidad de variación de la tensión es también proporcional a la frecuencia angular ω y para el valor eficaz de la corriente tenemos

$$I = 2\pi f C U.$$

Designando

$$x_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C},$$

donde x_C se llama reactancia capacitiva o capacitancia, obtenemos la ley de Ohm para un circuito de corriente alterna con capacidad

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

La tensión en las armaduras del condensador es:

$$U_C = I_C x_C.$$

La parte de tensión de la red que se encuentra en el condensador se llama *'caída capacitiva de tensión* y es otra *componente reactiva de tensión* (ver pág. 222); se designa con U_C.

La reactancia capacitiva x_C, lo mismo que la reactancia inductiva x_L, depende de la frecuencia de la corriente alterna.

Pero mientras que al aumentar la frecuencia, la reactancia inductiva crece, la capacitiva, al contrario, disminuye.

Ejemplo 6. Determinar la resistencia de un condensador de 5 μF de capacidad siendo la frecuencia 50 Hz:

$$x_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 636\Omega,$$

si la frecuencia es de 400 Hz:

$$x_C = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 400 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 79{,}5\Omega.$$

Apliquemos la fórmula de potencia media o activa para el circuito que se estudia:

$$P = UI\cos\varphi.$$

Puesto que en un circuito con condensador la corriente adelanta 90° a la tensión, entonces $\varphi = 90°$; $\cos\varphi = 0$.

Por lo tanto, la potencia activa es también nula, es decir, en tal circuito, igual que en un circuito con bobina de inductancia, la potencia no se gasta.

En la fig. 150 se muestra la curva de la potencia instantánea en un circuito con condensador. En el dibujo se ve que, en el primer

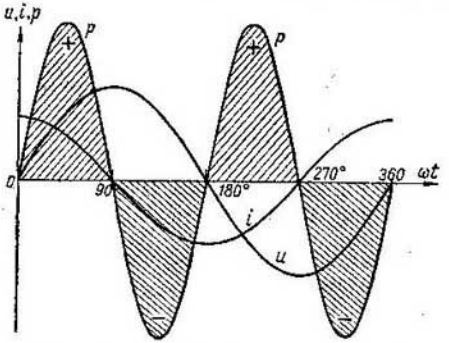


Fig. 150. Curva de la potencia instantánea en un circuito con condensador

cuarto de ciclo, el circuito con condensador toma de la red la energía que se acumula en el campo eléctrico del condensador.

La energía que acumula el condensador, para el momento cuando por éste pase la tensión máxima, se puede determinar por la fórmula:

$$A_E = \frac{CU_m^2}{2}.$$

En el siguiente cuarto de ciclo el condensador se descarga en la red, entregándole la energía acumulada antes.

Durante la segunda alternancia la fluctuación de la energía se repite. De este modo, en el circuito tiene lugar solamente el cambio de energía entre la red y el condensador, sin pérdidas.

§ 89. Conexión en serie de la resistencia activa y la reactancia inductiva (R, x_L)

En los esquemas de los circuitos de corriente alterna, las resistencias se representan del modo indicado en la fig. 151. En la práctica tropezamos a menudo con conductores que ofrecen tanto resistencia activa, como reactancia inductiva y capacitiva.

Supongamos que es necesario determinar la tensión de una red que debe aplicarse a los bornes de una bobina de inducción para que por ésta pase una corriente alterna. La bobina tiene resistencia activa y reactancia inductiva. Por eso, la tensión de la red ha de compensar

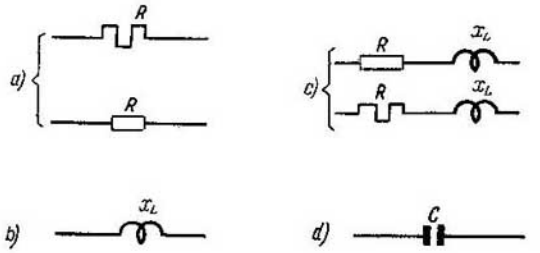


Fig. 151. Designaciones de las resistencias en los circuitos de corriente alterna

la caída activa de tensión, así como la f.e.m. de autoinducción que surge en la bobina. Tracemos el diagrama vectorial y la gráfica para este caso.

En la fig. 152 el vector I designa la corriente alterna de la bobina. La f.e.m. de autoinducción E_L en la bobina atrasa 90° de la corriente.

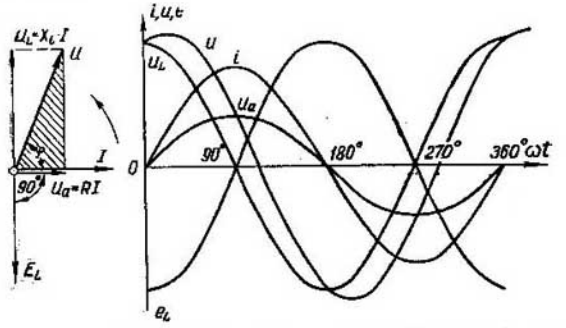


Fig. 152. Diagrama vectorial y gráfica para R y L conectados en serie

La parte de la tensión de la red, que compensa la f.e.m. de autoinducción, se indiça con el vector U_L, que es igual y contrario al vector E_L. La parte de tensión de la red que compensa la caída de tensión en la resistencia activa está representada con el vector U_a, que está en fase con la corriente. La tensión de la red debe ser igual a la suma geométrica de caídas de tensión activa U_a e inductiva U_L.

Se toma la suma geométrica porque U_a y U_L en la fig. 152 están representadas con vectores, y estos se suman geométricamente.

Ambas tensiones están a un ángulo determinado una respecto a la otra. Por eso, para obtener su suma geométrica hay que construir un paralelogramo sobre los vectores U_a y U_L. Su diagonal (resultante) dará la tensión de la red.

Como se ve en la fig. 152, el vector de la tensión de la red U adelanta al vector de la corriente I en un ángulo φ

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L}{U_a} = \frac{Ix_L}{IR} = \frac{x_L}{R}.$$

En la bobina que contiene sólo una reactancia inductiva, la tensión de la red adelanta 90° a la corriente, pero tomando en cuenta

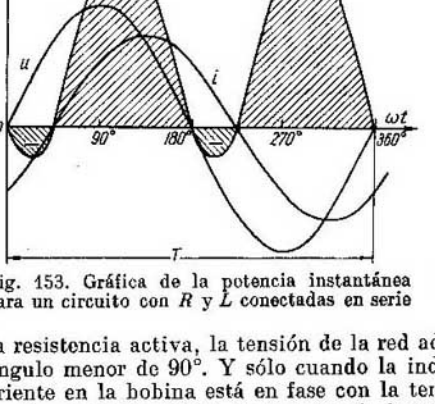


Fig. 153. Gráfica de la potencia instantánea para un circuito con R y L conectadas en serie



Fig. 154. Triángulo de tensiones

la resistencia activa, la tensión de la red adelanta la corriente en un ángulo menor de 90°. Y sólo cuando la inductancia es nula, la corriente en la bobina está en fase con la tensión de la red.

Tracemos la gráfica de la potencia instantánea para la conexión en serie de la resistencia y de la inductancia (fig. 153).

En la gráfica se ve que la potencia media o activa no es igual a cero, como observamos en un circuito con bobina de inductancia o con condensador. En este caso, durante cierta parte del ciclo, la potencia en el circuito se gasta para calentar la resistencia y formar el campo magnético de la bobina (la potencia es positiva). Durante otra parte del ciclo la potencia es devuelta a la red (es negativa).

De este modo, la potencia media o activa P de la corriente alterna, depende no sólo de las magnitudes de la tensión U y de la corriente I, sino también del desfasaje φ entre éstas. Cuanto mayor es el desfasaje entre la tensión y la corriente, es decir, cuanto mayor es el ángulo φ, tanto menor es el cos φ y tanto menor es la potencia activa.

§ 90. Triángulo de tensiones

Tracemos aparte (fig. 154) el triángulo de tensiones de la fig. 152. Puesto que este triángulo es rectangular, en caso de que uno de los lados sea desconocido, se puede determinar por medio del teorema de Pitágoras (el cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los catetos). Por consiguiente,

$$U^2 = U_a^2 + U_L^2,$$

de donde

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

Ejemplo 7. Determinar la tensión de la red que es necesario aplicar a los bornes de una bobina para crear en ésta una corriente de 5 A, si la resistencia activa R de la bobina es igual a 6Ω, y la reactancia inductiva x_L es igual a 8Ω.

La caída activa de tensión es:

$$U_a = I \cdot R = 5 \cdot 6 = 30 \text{ V}.$$

La caída inductiva de tensión es:

$$U_L = I \cdot x_L = 5 \cdot 8 = 40 \text{ V}.$$

La caída total de tensión es igual a la tensión de la red:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = \sqrt{900 + 1.600} = \sqrt{2.500} = 50 \text{ V}.$$

Es necesario señalar que la indicación del voltímetro de la red no es igual a la suma aritmética de los valores de U_a y U_L ($30 + 40 \neq 50$).

§ 91. Triángulo de impedancia

Si los lados del triángulo de tensiones (fig. 155,*a*) los dividimos por la corriente I (fig. 155,*b*), los ángulos del triángulo no cambiarán, y obtenemos un triángulo nuevo semejante al primero: el triángulo de impedancia (fig. 155,*c*).

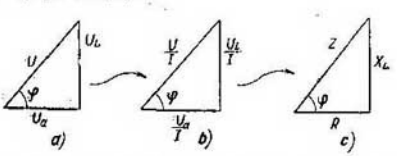


Fig. 155. Obtención de un triángulo de impedancia

En el triángulo de impedancia expuesto aparte en la fig. 156, todos los lados representan resistencias, y su hipotenusa es la impedancia del circuito.

Del triángulo de impedancia se ve, que la impedancia z es igual a la suma geométrica de la resistencia activa R y la reactancia inductiva x_L.

Aplicando el teorema de Pitágoras para el triángulo de impedancia obtenemos:

$$z^2 = R^2 + x_L^2,$$

de donde

$$z = \sqrt{R^2 + x_L^2}.$$

Si una de las resistencias del circuito (resistencia activa o reactancia inductiva), es, por ejemplo, 10 o más veces menor que la otra, la menor se puede despreciar, de lo que es fácil convencerse mediante un cálculo directo.

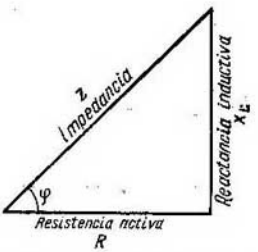


Fig. 156. Triángulo de impedancia

Ejemplo 8. Determinar la impedancia del circuito en el cual $R = 9\Omega$ y $x_L = 12\Omega$.

$$z = \sqrt{R^2 + x_L^2} = \sqrt{9^2 + 12^2} = \sqrt{81 + 144} = \sqrt{225} = 15\Omega.$$

Sería absolutamente incorrecto si para determinar la impedancia se sumasen aritméticamente ambas resistencias R y x_L, ya que

$$9 + 12 = 21\Omega.$$

Como vemos el resultado en este caso es incorrecto.

Ejemplo 9. La impedancia del devanado de un electroimán es $z = 25\Omega$; $R = 15\Omega$. Determinar la reactancia inductiva.

Puesto que

$$z^2 = R^2 + x_L^2,$$

entonces

$$x_L^2 = z^2 - R^2,$$

de donde

$$x_L = \sqrt{z^2 - R^2}.$$

Por lo tanto:

$$x_L = \sqrt{25^2 - 15^2} = \sqrt{625 - 225} = \sqrt{400} = 20\Omega.$$

Ejemplo 10. La reactancia inductiva del devanado de un electromotor de corriente alterna es de 14Ω. La impedancia del devanado es de 22Ω. Hallar la resistencia activa.

Puesto que

$$z^2 = R^2 + x_L^2,$$

entonces

$$R^2 = z^2 - x_L^2,$$

de donde

$$R = \sqrt{z^2 - x_L^2}.$$

Por lo tanto

$$R = \sqrt{22^2 - 14^2} = \sqrt{484 - 196} = \sqrt{288} = 16{,}97\Omega.$$

Ejemplo 11. En el circuito representado en la fig. 157 determinar la indicación del voltímetro.

$$U_a = I \cdot R = 5 \cdot 12 = 60 \text{ V}.$$

$$U_L = I \cdot x_L = 5 \cdot 16 = 80 \text{ V}.$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{60^2 + 80^2} = \sqrt{3.600 + 6.400} = \sqrt{10.000} = 100 \text{ V}.$$

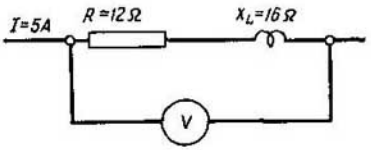


Fig. 157. Para el ejemplo 11

La impedancia será:

$$z = \sqrt{R^2 + x_L^2} = \sqrt{12^2 + 16^2} = \sqrt{144 + 256} = \sqrt{400} = 20\Omega.$$

Si multiplicamos z por la corriente I, obtenemos:

$$I \cdot z = 5 \cdot 20 = 100 \text{ V},$$

es decir, el resultado es el mismo que más arriba.

Por consiguiente, si

$$U_a = I \cdot R$$

y

$$U_L = I x_L,$$

entonces

$$U = Iz.$$

§ 92. Ley de Ohm para un circuito con resistencia activa e inductancia (R, L)

De la fórmula $U = I \cdot z$ se ve, que

$$I = \frac{U}{z} \text{ ó } I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + x_L^2}}.$$

Esto es la fórmula de la ley de Ohm para un circuito con conexión en serie de R y L.

Ejemplo 12. Determinar la corriente que pasa a través de una bobina, cuya reactancia inductiva es igual a 5Ω, y resistencia activa igual a 1Ω si la tensión de la red de corriente alterna es igual a 12 V.

La impedancia de la bobina será:

$$z = \sqrt{R^2 + x_L^2} = \sqrt{1^2 + 5^2} = \sqrt{26} = 5{,}1\Omega.$$

Aplicando la fórmula de la ley de Ohm para el circuito con R, L, obtenemos:

$$I = \frac{U}{z} = \frac{12}{5{,}1} = 2{,}35 \text{ A}.$$

En los casos particulares, cuando en el circuito de corriente alterna sólo está presente la resistencia activa R, la corriente se determina por la fórmula:

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

En los casos en que en el circuito hay una reactancia inductiva y la resistencia activa es tan pequeña que se puede despreciar, la fórmula de la ley de Ohm adquiere la forma de:

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

Si es necesario determinar la resistencia activa de un consumidor de corriente alterna que dispone de cierta impedancia (devanado

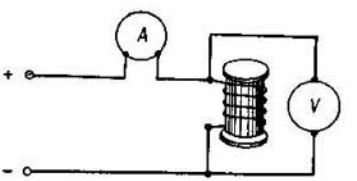


Fig. 158. Determinación de la resistencia activa del consumidor de corriente alterna

de electromotor, de bobina de inducción o de electroimán), hay que conectar este consumidor al circuito de corriente continua (fig. 158). Dividiendo la indicación del voltímetro, conectado a los bornes del consumidor, por la indicación del amperímetro intercalado en serie al circuito, obtenemos la magnitud de la resistencia activa, ya que

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

Lo expuesto es justo sólo para bajas frecuencias, cuando se puede despreciar el efecto pelicular y considerar la resistencia activa del consumidor igual a su resistencia con corriente continua.

§ 93. Conexión en serie de una resistencia activa y una capacidad (R, C)

En la fig. 159 se dan el esquema y el diagrama vectorial para un circuito con una resistencia activa y una capacidad conectadas en serie. La tensión U de la red es la suma geométrica de caídas de tensión en los diferentes sectores del circuito, es decir, de la caída activa de tensión U_a, que está en fase con la corriente, y de la caída de tensión en la reactancia capacitiva U_C que está atrasada 90° con

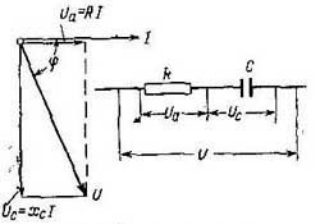


Fig. 159. Conexión en serie de R y C

respecto a la corriente. La tensión aplicada a los bornes del circuito se atrasa de la corriente en un ángulo φ, cuya tangente hallaremos en el diagrama vectorial de la fig. 159:

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{U_C}{U_a}=\frac{x_CI}{RI}=\frac{x_C}{R}=\frac{1}{R\omega C}.$$

La conexión en serie de la resistencia activa y de la capacidad tiene una importancia práctica. La conexión de un condensador con dieléctrico real al circuito de corriente alterna se puede representar esquemáticamente como conexión en serie de R y C. Si la resistencia del dieléctrico fuese infinita ($R=\infty$, dieléctrico ideal), el ángulo de desfasaje entre la tensión y la corriente sería de 90°. Pero la corriente de conductividad, provocada por la imperfección del dieléctrico, reduce el ángulo de desfasaje. La diferencia entre 90° y el ángulo de desfasaje entre la tensión y la corriente se designa con la letra δ (delta) y se denomina **ángulo de pérdidas dieléctricas**.

La potencia de las pérdidas en el dieléctrico o pérdidas dieléctricas se determina por la fórmula:

$$P=U^2 2\pi f C \operatorname{tg}\delta \text{W}.$$

donde: U = tensión, en V;
f = frecuencia de la corriente, en Hz;
C = capacidad del condensador, en F.

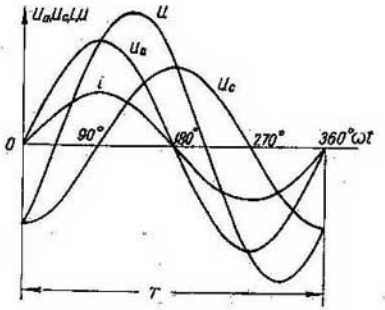


Fig. 160. Curvas de valores instantáneos de la tensión y corriente para un circuito con R y C conectadas en serie

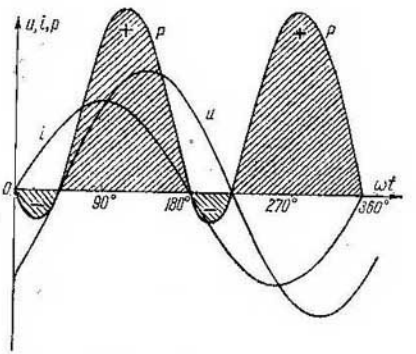


Fig. 161. Curva de potencia instantánea para un circuito con R y C conectadas en serie

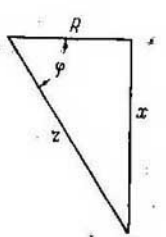


Fig. 162. Triángulo de impedancia para R y C conectadas en serie

En la fig. 160 se dan las curvas de los valores instantáneos de las tensiones y de la corriente para la conexión en serie de R y C. La curva de la potencia instantánea para este caso se muestra en la fig. 161.

En el dibujo se ve que durante cierta parte del ciclo, la energía se gasta en el circuito en el calentamiento de la resistencia R y la formación del campo eléctrico (potencia positiva). Durante otra parte del ciclo la energía acumulada en el campo eléctrico del condensador vuelve a la red.

La potencia activa es como antes, igual a:

$$P = UI \cos \varphi.$$

Del diagrama vectorial hallamos:

$$U = \sqrt{I^2R^2 + I^2x_C^2} = I\sqrt{R^2 + x_C^2},$$

designando

$$z = \sqrt{R^2 + x_C^2},$$

obtenemos la ley de Ohm para un circuito con la resistencia activa y la capacidad conectadas en serie (circuitos R y C):

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + x_C^2}},$$

donde z = impedancia del circuito.

Dividiendo los lados del triángulo de tensiones (fig. 159) por la corriente I, obtenemos el triángulo de impedancia para el mismo circuito (fig. 162).

§ 94. Conexión en serie de una resistencia activa, una inductancia y una capacidad (R, L, C)

En la fig. 163 se dan el esquema y el diagrama vectorial para un circuito con una resistencia activa, una inductancia y una capacidad conectadas en serie.

La tensión en los bornes del circuito es igual a la suma de caídas de tensión en los sectores del circuito: de la caída activa de tensión y de las caídas de tensiones en las reactancias inductiva y capacitiva.

Las tensiones U_L y U_C están desfasadas en una alternancia (180°). Por eso durante la suma geométrica de los vectores, éstos se restan recíprocamente.

Del diagrama vectorial hallamos:

$$U = \sqrt{I^2R^2 + I^2(x_L - x_C)^2} = I\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}.$$

La ley de Ohm para el circuito dado será:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{z}$$

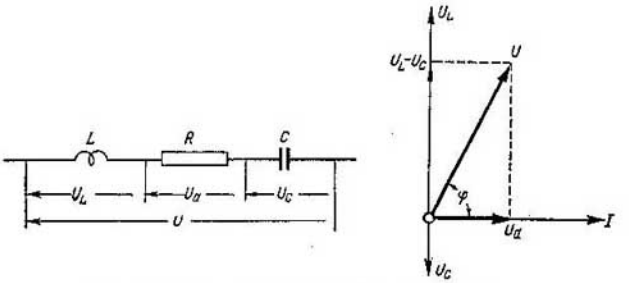


Fig. 163. Conexión en serie de R, L y C

donde la impedancia del circuito es:

$$z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}.$$

Cuando $x_L = x_C$, la corriente en el circuito será igual a:

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

es decir, el circuito se comportará como si tuviese sólo la resistencia activa, coincidiendo en fase la corriente y la tensión de la red. Este caso se denomina resonancia de tensiones. La gráfica y el diagrama vectorial de la resonancia de tensiones están dados en la fig. 164.

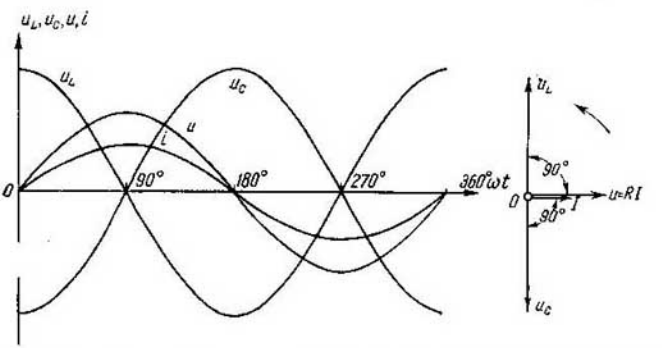


Fig. 164. ráfica y diagrama vectorial para la resonancia de tensiones

La condición para la resonancia de tensiones es la igualdad

$$x_L = x_C \text{ o } \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Por lo tanto la resonancia de tensiones puede producirse si:

1) siendo constante la inductancia, la capacidad varía y se hace igual a:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L};$$

2) siendo constante la capacidad, varía la inductancia y se hace igual a:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C};$$

3) la variación de ambas magnitudes L y C es igual a:

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

4) por fin, la frecuencia angular de la red, variando, se hace igual a:

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

Ejemplo 13. Se da un circuito que consta de una resistencia activa, una inductancia y una capacidad conectadas en serie; $R = 6\Omega$; $x_L = 10\Omega$; $x_C = 2\Omega$. La tensión en los bornes del circuito es de 120 V. Determinar la corriente del circuito con las resistencias dadas, así como la corriente durante la resonancia de tensiones, si $x_L = x_C = 10\Omega$.

La corriente en el circuito es:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{120}{\sqrt{6^2 + (10-2)^2}} = \frac{120}{10} = 12 \text{ A}.$$

Las tensiones en los sectores del circuito:

$$U_a = IR = 12 \cdot 6 = 72 \text{ V};$$
$$U_L = Ix_L = 12 \cdot 10 = 120 \text{ V};$$
$$U_C = Ix_C = 12 \cdot 2 = 24 \text{ V}.$$

La corriente durante la resonancia de tensiones es:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{6} = 20 \text{ A}.$$

Las tensiones en los sectores del circuito son:

$$U_a = IR = 20 \cdot 6 = 120 \text{ V};$$
$$U_L = Ix_L = 20 \cdot 10 = 200 \text{ V};$$
$$U_C = Ix_C = 20 \cdot 10 = 200 \text{ V}.$$

Como se ve del ejemplo dado, la corriente durante la resonancia de tensiones aumentó, y las tensiones en los sectores del circuito crecieron. En determinadas condiciones esto puede representar cierto peligro para las instalaciones de corriente alterna, ya que un aumento excesivo de la tensión en los sectores del circuito puede llevar a la perforación de la aislación de las bobinas, aparatos, instrumentos, a la perforación del dieléctrico del condensador, etc.

§ 95. Conductancia en un circuito de corriente alterna

La solución de las cuestiones ligadas con la conexión en derivación de los circuitos de corriente alterna, al igual que para la corriente continua, se realiza por medio de conductancias.

Representemos en la fig. 165 un diagrama vectorial. Proyectando el vector de la corriente I sobre la dirección del vector de la tensión U, descomponemos el vector de la corriente en dos componentes.

Una de las componentes coincide en dirección con el vector de la tensión y se llama componente activa de la corriente. Se designa con la letra I_a y es igual a:

$$I_a = I \cos \varphi.$$

Otra componente perpendicular al vector de la tensión se llama componente reactiva de la corriente, se designa con I_r y es igual a:

$$I_r = I \operatorname{sen} \varphi.$$

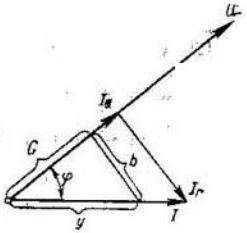


Fig. 165. Descomposición de la corriente en las componentes activa y reactiva

Según la ley de Ohm para los circuitos de corriente alterna tenemos:

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

Del triángulo de impedancias es fácil obtener:

$$\cos \varphi = \frac{R}{z}; \qquad \operatorname{sen} \varphi = \frac{x}{z}.$$

Aplicando estas tres expresiones, obtendremos:

$$I_a = I \cos \varphi = \frac{U}{z} \cdot \frac{R}{z} = U \cdot \frac{R}{z^2}.$$

Igual que en la fórmula para la corriente continua ($I = UG$), sustituyamos en ésta $\frac{R}{z^2}$ por G. La fórmula obtenida tendrá la forma siguiente:

$$I_a = UG.$$

La magnitud G se llama conductancia activa. De acuerdo con lo expuesto obtendremos:

$$I_r = I \operatorname{sen} \varphi = \frac{U}{z} \cdot \frac{x}{z} = U \cdot \frac{x}{z^2}.$$

Designando $\frac{x}{z^2}$ con b, obtendremos:

$$I_r = Ub.$$

La magnitud b se llama conductancia reactiva.

Por fin

$$I = \frac{U}{z} = U\,\frac{1}{z}\,.$$

Designando $\frac{1}{z}$ con y, obtendremos:

$$I = U \cdot y.$$

La magnitud y se llama conductancia total.

Las conductancias activa, reactiva y total se miden en mhos (o siemens, S).

En la fig. 165 está representado un triángulo de corrientes con los lados I, I_a, I_r.

Según el teorema de Pitágoras tenemos:

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 \text{ o } I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}.$$

Dividiendo todos los lados del triángulo de corrientes por U:

$$\frac{I_a}{U} = G; \qquad \frac{I_r}{U} = b; \qquad \frac{I}{U} = y,$$

obtendremos un triángulo de conductancias con los lados G, b e y. Del triángulo tenemos.

$$y^2 = G^2 + b^2 \text{ o } y = \sqrt{G^2 + b^2}.$$

§ 96. Derivación de un circuito de corriente alterna

En la fig. 166, a la izquierda, se muestra la conexión en paralelo de dos derivaciones R_1, L_1 y R_2, L_2.

Las impedancias de las derivaciones serán iguales a:

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2};$$
$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}.$$

Las corrientes de las derivaciones son:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}\,;$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}}\,.$$

Los ángulos de desfasaje entre la tensión y las corrientes en las derivaciones son:

$$\cos\varphi_1 = \frac{R_1}{z_1} \text{ y } \cos\varphi_2 = \frac{R_2}{z_2}\,.$$

En la fig. 166, a la derecha, se da el diagrama vectorial para la conexión en paralelo de las derivaciones R_1, L_1 y R_2, L_2. El

trazado del diagrama comienza con el del vector de la tensión, ya que la tensión es común para las dos derivaciones. En vista de la presencia de R y L en las derivaciones, las corrientes I_1 y I_2 están atrasadas los ángulos φ_1 y φ_2 con respecto a la tensión U.

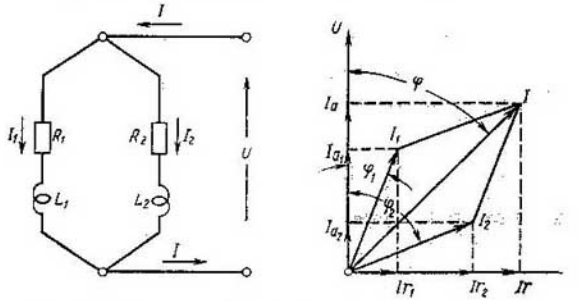


Fig. 166. Conexión en paralelo de las derivaciones R_1, L_1 y R_2, L_2

Después de trazar los vectores de las corrientes I_1 y I_2 y sumarlos según la regla del paralelogramo, obtenemos el vector de la corriente I que pasa por el sector común del circuito. Del diagrama se ve que

$$I_a = I_{a_1} + I_{a_2}.$$

Sustituyendo en la ecuación las expresiones para las corrientes, por el producto de la tensión por la conductancia, obtendremos:

$$UG = UG_1 + UG_2$$

o

$$G = G_1 + G_2$$

Análogamente:

$$I_r = I_{r_1} + I_{r_2};$$
$$Ub = Ub_1 + Ub_2;$$
$$b = b_1 + b_2.$$

La corriente total es igual a:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{U^2G^2 + U^2b^2} = U\sqrt{G^2 + b^2} = Uy.$$

De este modo, todo el circuito dispone de conductancias activa y reactiva iguales a la suma de conductancias activas y reactivas de las derivaciones.

Ejemplo 14. Para el circuito expuesto en la fig. 166 se da: $R_1 = 4\Omega$; $L_1 = 0{,}01$H; $R_2 = 3\Omega$; $L_2 = 0{,}05$H.

La tensión de la red es de 127 V, la frecuencia, 50 Hz. Determinar las corrientes en las derivaciones y en el sector común del circuito.

Solución

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2} = \sqrt{4^2 + (2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}01)^2} = 5{,}075\Omega;$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{z_1} = \frac{4}{5{,}075} = 0{,}788; \qquad \varphi_1 = 38°;$$

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2} = \sqrt{3^2 + (2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}02)^2} = 6{,}95\Omega;$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{z_2} = \frac{3}{6{,}95} = 0{,}432; \qquad \varphi_2 = 64°20';$$

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{127}{5{,}075} = 25 \text{ A}; \qquad I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{127}{6{,}95} = 18{,}3 \text{ A}.$$

Para determinar la corriente I, hallamos primero las conductancias

$$G_1 = \frac{R_1}{z_1^2} = \frac{4}{5{,}075^2} = 0{,}155 \text{ mhos};$$

$$b_1 = \frac{x_1}{z_1^2} = \frac{314 \cdot 0{,}01}{5{,}075^2} = 0{,}122 \text{ mhos};$$

$$G_2 = \frac{r_2}{z_2^2} = \frac{3}{6{,}95^2} = 0{,}0622 \text{ mhos};$$

$$b_2 = \frac{x_2}{z_2^2} = \frac{314 \cdot 0{,}02}{6{,}95^2} = 0{,}13 \text{ mhos};$$

$$G = G_1 + G_2 = 0{,}155 + 0{,}0622 = 0{,}2172 \text{ mhos};$$

$$b = b_1 + b_2 = 0{,}122 + 0{,}13 = 0{,}252 \text{ mhos};$$

$$y = \sqrt{G^2 + b^2} = \sqrt{0{,}2172^2 + 0{,}252^2} = 0{,}332 \text{ mhos}.$$

La corriente en el sector común del circuito es igual a:

$$I = Uy = 127 \cdot 0{,}332 = 42{,}2 \text{ A};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{G} = \frac{0{,}252}{0{,}2172} = 1{,}16; \qquad \varphi = 49°15'.$$

Examinemos la conexión en paralelo de las derivaciones que contienen L y C (fig. 167, a la izquierda):

Las impedancias de las derivaciones serán:

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2};$$

$$z_2 = R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2.$$

Las corrientes de las derivaciones serán:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}};$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}}$$

Los ángulos de desfasaje entre la tensión y las corrientes en las derivaciones son:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{z_1};$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{z_2}.$$

El diagrama vectorial, expuesto a la derecha en el mismo dibujo, comienza con el trazado del vector de la tensión U. Después, van trazados los vectores de las corrientes I_1 y I_2 formando los ángulos

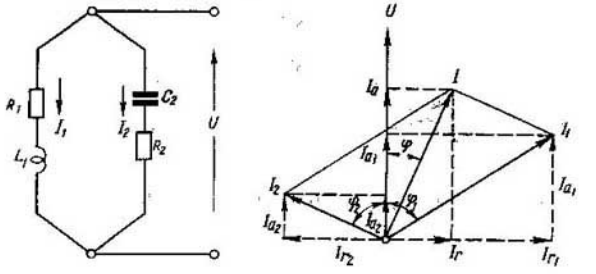


Fig. 167. Conexiones en paralelo de las derivaciones L y C

φ_1 y φ_2. Conviene señalar que la corriente I_1, en la derivación con inductancia, está retrasada en un ángulo φ_1 con respecto a la tensión, y la corriente I_2, en el circuito con capacidad, adelanta en un ángulo φ_2 a la tensión. Sumando los vectores de las corrientes I_1 y I_2 según la regla de paralelogramo, obtenemos el vector de la corriente I.

Del trazado del diagrama vectorial se ve que

$$I_a = I_{a_1} + I_{a_2},$$

o bien,

$$UG = UG_1 + UG_2,$$

de donde

$$G = G_1 + G_2.$$

Por consiguiente, la conductancia activa de todo el circuito es igual a la suma de las conductancias activas de todas las derivaciones.

Determinemos la conductancia reactiva de la derivación:

$$I_r = I_{r_1} - I_{r_2},$$

o bien,

$$Ub = Ub_1 - Ub_2,$$

de donde

$$b = b_1 - b_2,$$

donde b_2 = conductancia reactiva del circuito con capacidad que es igual a

$$b_2 = \frac{x_C}{z_2^2} = \frac{\frac{1}{\omega C_2}}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2} \text{ mhos.}$$

De este modo, la conductancia reactiva de todo el circuito es igual a la diferencia de las conductancias reactivas de las derivaciones.

Seleccionando los parámetros del circuito L, C, R_1, R_2 o de la frecuencia f, se puede conseguir que la corriente común I coincida

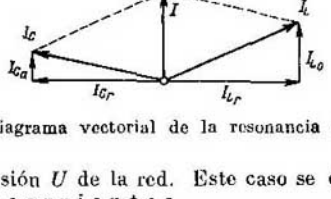


Fig. 168. Diagrama vectorial de la resonancia de corrientes

en fase con la tensión U de la red. Este caso se denomina r e s o n a n c i a d e c o r r i e n t e s.

Como se ve en la fig. 168, la resonancia de corrientes surge cuando las componentes reactivas de las corrientes en las derivaciones con inductancia I_{L_r} y capacidad I_{C_r} son iguales entre sí, o sea $I_{L_r} = I_{C_r}$. Si se observa esta condición, la corriente I en el sector común del circuito coincide en fase con la tensión U.

Se debe reconocer, que al elegir debidamente la inductancia, capacidad y resistencias de las derivaciones paralelas, la corriente I en el sector común del circuito puede ser pequeña, mientras que las corrientes en las derivaciones con inductancia y capacidad pueden ser bastante considerables.

Ejemplo 15. Para el circuito representado en la fig. 167 se da:

$$R_1 = 5\Omega; \quad L_1 = 0{,}05 \text{ H}; \quad R_2 = 5\Omega; \quad C_2 = 100 \ \mu F.$$

La tensión de la red es de 220 V, la frecuencia, 50 c/s.

Hallar las corrientes en las derivaciones y en el sector común del circuito.

S o l u c i ó n

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314 \ \frac{1}{\text{seg}};$$

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2} = \sqrt{5^2 + (314 \cdot 0{,}05)^2} = 16{,}5\Omega;$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{z_1} = \frac{5}{16{,}5} = 0{,}303; \qquad \varphi_1 = 72°20'.$$

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2} = \sqrt{5^2 + \left(\frac{1}{314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}\right)^2} = 32{,}2\Omega.$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{z_2} = \frac{5}{32{,}2} = 0{,}155; \qquad \varphi_2 = 81°;$$

las corrientes en las derivaciones serán:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{220}{16{,}5} = 13{,}33 \text{ A}; \qquad I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{220}{32{,}2} = 6{,}84 \text{ A}$$

las conductancias de las derivaciones serán:

$$G_1 = \frac{R_1}{z_1^2} = \frac{5}{16{,}5^2} = 0{,}0184 \text{ mhos};$$

$$G_2 = \frac{R_2}{z_2^2} = \frac{5}{32{,}2^2} = 0{,}0048 \text{ mhos};$$

$$b_1 = \frac{x_1}{z_1^2} = \frac{314 \cdot 0{,}05}{16{,}5^2} = 0{,}0579 \text{ mhos};$$

$$b_2 = \frac{x_2}{z_2^2} = \frac{1}{\frac{314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{32{,}2^2}} = 0{,}0307 \text{ mhos};$$

la conductancia de todo el circuito:

$$G = G_1 + G_2 = 0{,}0184 + 0{,}0048 = 0{,}0232 \text{ mhos};$$

$$b = b_1 - b_2 = 0{,}0579 - 0{,}0307 = 0{,}0272 \text{ mhos};$$

$$y = \sqrt{G^2 + b^2} = \sqrt{0{,}0232^2 + 0{,}0272^2} = 0{,}0358 \text{ mhos};$$

la corriente en el sector común del circuito:

$$I = Uy = 220 \cdot 0{,}0358 = 7{,}9 \text{ A};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{G} = \frac{0{,}0272}{0{,}0232} = 1{,}17; \qquad \cos \varphi = 0{,}649; \qquad \varphi = 49°30'$$

§ 97. Circuito oscilante

Al estudiar el caso de conexión en paralelo de una inductancia y una capacidad, hemos visto que en el sector común del circuito la corriente puede ser pequeña, mientras que las corrientes en las derivaciones paralelas pueden alcanzar una magnitud grande. Si examinamos el caso cuando las resistencias activas de las derivaciones paralelas son nulas, veremos que las corrientes en éstas estarán desfasadas 90° respecto a la tensión aplicada. Si al mismo tiempo conseguimos la igualdad de las reactancias ($x_L = x_C$), en las derivaciones fluirán corrientes iguales, siendo la corriente común nula. El diagrama vectorial para este caso está representado en la fig. 169.

Puesto que la corriente común es nula, se pueden desconectar los conductores por los que se suministra la corriente alterna. En el circuito cerrado, formado por la bobina y el condensador, pasará una corriente alterna.

Hasta ahora hemos analizado los casos en que por los circuitos eléctricos pasaban corrientes suministradas de los alternadores.

Ahora analicemos el caso para obtener corriente alterna mediante la descarga del condensador en una bobina.

Un condensador cargado dispone de cierta reserva de energía eléctrica. Al cerrarse con una bobina comienza a descargarse y disminuye su reserva de energía eléctrica. La corriente de descarga del condensador, pasando por las espiras de la bobina, crea un campo magnético. Por consiguiente, la bobina empieza a acumular energía magnética. Cuando el condensador se descargue por completo, su energía eléctrica será nula. En este momento la bobina dispondrá de la reserva máxima de energía magnética. Ahora la bobina se transforma en generador de corriente eléctrica y comienza a cargar de nuevo el condensador. La f.e.m. de autoinducción que surge en la bobina durante el incremento del campo magnético impide el paso de la corriente. Pero ahora, cuando el campo magnético de la bobina va disminuyendo, la f.e.m. de autoinducción tiende a sostener la corriente en la misma dirección. En el momento en que la energía magnética de la bobina sea nula, las armaduras del condensador se habrán cargado de modo contrario a la carga anterior, y, si la resistencia del circuito es nula, el condensador obtendrá la reserva inicial de energía eléctrica. Después el condensador se irá descargando de nuevo, creando en el circuito una corriente en dirección contraria, y el proceso se repetirá.

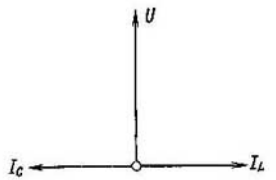


Fig. 169. Diagrama vectorial simplificado de la resonancia de corrientes

Las transformaciones sucesivas de energía eléctrica en magnética y viceversa forman la base del proceso de las oscilaciones electromagnéticas. Un circuito, compuesto de una capacidad y una inductancia, en el cual tiene lugar el proceso de oscilaciones electromagnéticas se llama c i r c u i t o o s c i l a n t e.

Las oscilaciones periódicas de energía que tienen lugar en un circuito oscilante podrían continuar infinitamente en forma de oscilaciones no amortiguadas, si no existiesen pérdidas en el circuito oscilante. Pero la presencia de la resistencia activa lleva a que la reserva de energía del circuito disminuya después de cada ciclo a costa de las pérdidas en calor en la resistencia activa, debido a lo cual las oscilaciones van amortiguándose.

El ciclo de oscilaciones electromagnéticas en un circuito oscilante sin resistencia se determina por la fórmula de Thompson:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \text{ seg.}$$

La magnitud T se denomina c i c l o p r o p i o d e o s c i l a c i o n e s d e l c i r c u i t o.

La frecuencia propia de oscilaciones del circuito f se determin por la fórmula:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \frac{1}{\text{seg}}.$$

Así es que se puede cambiar el tiempo del ciclo de oscilaciones del circuito mediante dos métodos: variando la inductancia de la bobina o la capacidad del condensador. Ambos métodos se utilizan para este fin en la radiotecnia.

El circuito oscilante es una parte integrante de todo receptor y transmisor de radio.

El principio de una radiotransmisión consiste en lo siguiente. En la antena de la radioestación transmisora se crean, por medio de osciladores de válvula, oscilaciones electromagnéticas. La amplitud de las oscilaciones depende de varios factores, incluyendo la magnitud de la corriente que circula en el circuito del micrófono que recibe las ondas del sonido condicionadas por el habla o la música.

La variación de las oscilaciones de alta frecuencia, por medio de ondas sonoras, se llama m o d u l a c i ó n.

La antena de la radioestación transmisora emite al espacio ondas electromagnéticas moduladas. Al llegar a la antena del radiorreceptor, las radioondas inducen en ésta una f.e.m. débil, cuya frecuencia es igual a la de la onda emitida. Ahora es necesario permitir al radioyente sintonizar su receptor en la onda necesaria entre la gama de ondas de muchas otras estaciones en funcionamiento. Para ello la antena se une con el circuito oscilante. Variando la capacidad o la inductancia se puede conseguir la resonancia en el circuito, con lo cual la f.e.m. alterna, inducida en la antena receptora, se amplificará muchas veces. La amplificación ulterior de las oscilaciones obtenidas se alcanza con ayuda de válvulas electrónicas o aparatos a base de semiconductores. La frecuencia de las oscilaciones electromagnéticas que se aplican en la radiotecnia es muy grande (varios millones de hertzios). Estas oscilaciones no pueden ser transformadas directamente en vibraciones de la membrana del auricular para actuar sobre el oído. Por lo tanto, las oscilaciones moduladas de alta frecuencia que emite la antena de la estación transmisora, llegando al receptor, deben ser d e t e c t a d a s. Esto se consigue por medio de un detector de cristal, válvulas electrónicas o semiconductores. Las oscilaciones de baja frecuencia obtenidas después de la detección se amplifican y se conducen al altoparlante.

La comunicación por radio fue realizada por primera vez por el destacado científico ruso Alexandr Popov (1859—1905).

Popov es inventor del telégrafo sin hilos (radio) de enorme importancia para la humanidad. Después de un trabajo tenaz Popov consiguió que el radiorreceptor construido por él recibiera señales de radio a una distancia de varios kilómetros. El 25 de abril (el 7 de mayo) de 1895 Popov hizo una demostración de su radiorreceptor en la sesión de la Sociedad rusa de física y química. Esta fecha se considera como el día de la invención de la radio. Probando su

radiorreceptor. Popov descubrió la acción en la pantalla y la reflexión de las señales de radio por los objetos metálicos. En este principio se basa el radar.

Popov fue profesor y director del Instituto electrotécnico de Petersburgo.

Los méritos de Popov en la invención de la radio fueron reconocidos oficialmente en 1900, otorgándosele un diploma de honor y una medalla de oro en el Cuarto Congreso Electrotécnico Mundial en París.

§ 98. Triángulo de potencias

Si las magnitudes de los lados de un triángulo de tensiones (fig. 170,*a*) las multiplicamos por la corriente I (fig. 170,*b*), obtenemos un triángulo de potencias (fig. 170,*c*). Todos los lados del

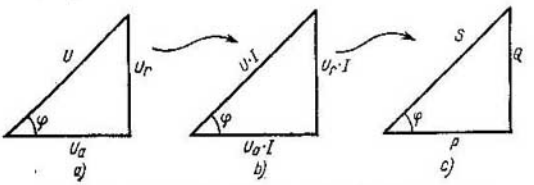


Fig. 170. Obtención de un triángulo de potencias

triángulo, expuesto separadamente en la fig. 171, representan potencias.

La hipotenusa del triánuglo de potencias es la potencia aparente S.

$$S = UI.$$

Esta se mide en voltamperios (VA) o kilovoltamperios (kVA) según las indicaciones del voltímetro y del amperímetro. La magnitud

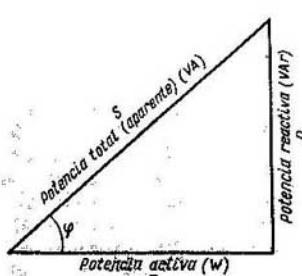


Fig. 171. Triángulo de potencias

de la potencia aparente caracteriza las dimensiones principales (máximas) de los generadores y transformadores. Efectivamente, el aislamiento de los devanados de los generadores y transformadores

se calcula para una tensión determinada, y la magnitud de la corriente determina el calentamiento de sus devanados (I^2R).

El cateto adyacente al ángulo φ representa la potencia activa P que es conocida.

$$P = U_a I.$$

Puesto que $U_a = IR$, entonces

$$P = I^2R.$$

La potencia activa en los circuitos de corriente alterna se consume en el calentamiento. En los motores de corriente alterna, la mayor parte de la potencia activa se transforma en potencia mecánica.

La potencia activa se mide con un vatímetro y se expresa en vatios (W) o kilovatios (kW). Del triángulo de potencias tenemos:

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi.$$

La potencia activa (o real) caracteriza el grado de carga del motor primario que hace girar el generador.

El cateto opuesto al ángulo φ representa la potencia reactiva Q

$$Q = U_r I.$$

Puesto que $U_r = Ix$ (donde x = reactancia),

$$Q = I^2x.$$

La potencia reactiva está condicionada por la presencia de los campos magnéticos y eléctricos en las inductancias y capacidades de los circuitos. Del triángulo de potencias tenemos:

$$Q = S \operatorname{sen} \varphi = UI \operatorname{sen} \varphi$$

La potencia reactiva se mide en voltamperios reactivos (VAr) o kilovoltamperios reactivos (kVAr). Aplicando el teorema de Pitágoras al triángulo de potencias obtendremos:

$$S^2 = P^2 + Q^2,$$

o sea,

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Estudiemos el circuito eléctrico representado en la fig. 172, que incluye reactancia inductiva y resistencia activa e instrumentos de medición: amperímetro, voltímetro y vatímetro. La estructura del vatímetro será descrita detalladamente en el capítulo XIV.

1. Si conectamos este circuito a una corriente continua, queda sólo la resistencia activa R, ya que la reactancia inductiva x_L en caso de corriente continua es nula, y entonces

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{24} = 5 \text{ A}.$$

El amperímetro indicará una corriente de 5 A.

La potencia

$$P = IU = 5 \cdot 120 = 600 \text{ W},$$

o bien,

$$P = I^2R = 25 \cdot 24 = 600 \text{ W}.$$

Por consiguiente, el vatímetro indicará 600 W. De este modo un vatímetro intercalado en el circuito de corriente continua indicará

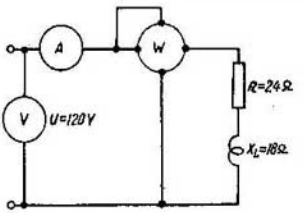


Fig. 172. Circuito eléctrico con resistencia activa y reactancia inductiva e instrumentos de medición

la potencia que consume el circuito, en vatios. La indicación del vatímetro es igual al producto de las indicaciones del voltímetro por las del amperímetro.

2. Conectemos el mismo circuito a la corriente alterna.

En este caso:

$$z = \sqrt{R^2 + x_L^2} = \sqrt{24^2 + 18^2} = \sqrt{900} = 30\Omega.$$

La corriente en el circuito será:

$$I = \frac{U}{z} = \frac{120}{30} = 4 \text{ A}.$$

El amperímetro indicará una corriente de 4 A.

Calculemos la potencia que se consume en el calentamiento.

$$P = I^2R = 4^2 \cdot 24 = 384 \text{ W}.$$

La indicación del vatímetro en este caso será de 384 W.

La potencia total que el circuito consume del generador de corriente alterna será

$$S = IU = 4 \cdot 120 = 480 \text{ VA}.$$

Por consiguiente, el generador que alimenta este circuito entrega la potencia total $S = 480$ VA. Pero en el circuito mismo sólo se pierde irremisiblemente, en forma de calor, la potencia activa $P = 384$ W.

De aquí se ve, que un circuito de corriente alterna que, además de tener una resistencia activa, tiene la reactancia inductiva, gasta

en calor sólo una parte de la potencia total que éste recibe. La parte restante, potencia reactiva, tan pronto es tomada por el circuito del alternador y acumulada en el campo magnético, como es devuelta al generador.

§ 99. Factor de potencia («coseno fi»)

Se llama factor de potencia o «coseno fi» (cos φ) de un circuito la relación entre la potencia activa y la aparente.

$$\text{Factor de potencia} = \frac{\text{potencia activa } P}{\text{potencia aparente (total) } S}$$

Generalmente la potencia activa es menor que la aparente, es decir, en este quebrado el numerador es menor que el denominador, por lo cual el factor de potencia es menor que la unidad.

Sólo en caso de una carga puramente activa, cuando toda la potencia es activa, el numerador y el denominador de dicho quebrado son iguales, y por eso el factor de potencia es igual a la unidad.

La potencia reactiva es consumida por la carga, y en caso de que no se tomen medidas especiales ésta cargará toda la línea que va del generador a la carga. A un circuito que contiene una carga inductiva no se le puede librar de la potencia reactiva, pero es necesario descargar el generador de esta potencia.

Cuanto mayor es la potencia activa respecto a la aparente, tanto menor es la diferencia entre el numerador y el denominador del quebrado y tanto más próximo a la unidad resulta el factor de potencia. El problema consiste en hacer pasar, de la línea al consumidor, sólo la magnitud mínima necesaria de la potencia reactiva.

Del triángulo de potencias (véase la fig. 171) obtenemos:

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi.$$

El cos φ, o factor de potencia, se mide con un instrumento especial, fasímetro, descrito en el capítulo XIV.

Ejemplo 16. El amperímetro indica una corriente de 10 A; el voltímetro, 120 V; el vatímetro, 1 kW. Determinar el cos φ del consumidor.

$$S = IU = 10 \cdot 120 = 1.200 \text{ VA};$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1.000}{1.200} = 0{,}83.$$

Ejemplo 17. Determinar la potencia activa que entrega un generador de corriente alterna monofásica a la red, si el voltímetro en el cuadro del generador indica 220 V; el amperímetro 20 A; el fasímetro, 0,8.

$$P = IU \cos \varphi = 20 \cdot 220 \cdot 0{,}8 = 3.520 \text{ W} = 3{,}52 \text{ kW}.$$

La potencia total

$$S = IU = 20 \cdot 220 = 4.400 \text{ VA} = 4{,}4 \text{ kVA}.$$

Ejemplo 18. El voltímetro instalado en el cuadro del motor eléctrico indica 120 V; el amperímetro, 450 A; el vatímetro, 50 kW. Determinar z, R, x_L, S, $\cos\varphi$, Q.

$$z = \frac{U}{I} = \frac{120}{450} = 0{,}267\Omega.$$

Puesto que $P = I^2 \cdot R$, entonces

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{50.000}{450^2} = 0{,}247\Omega,$$

$$x_L = \sqrt{z^2 - R^2} = \sqrt{0{,}267^2 - 0{,}247^2} = \sqrt{0{,}01} = 0{,}1\Omega,$$

$$S = IU = 450 \cdot 120 = 54.000 \text{ VA} = 54 \text{ kVA};$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{50.000}{54.000} = 0{,}927,$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{54.000^2 - 50.000^2} = \sqrt{416.000.000} =$$

$$= 20.396 \text{ VAr} = 20{,}396 \text{ kVAr}.$$

Los triángulos de impedancia, tensiones y potencias para un circuito determinado son semejantes, ya que sus lados son proporcionales. De cada triángulo se puede hallar el «coseno fi» del circuito,

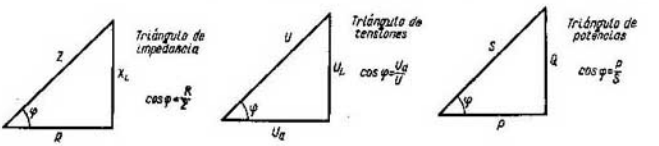


Fig. 173. Determinación del factor de potencia de los triángulos de impedancia, de tensiones y de potencias

como se muestra en la fig. 173. Esto puede ser aprovechado para la solución de diferentes problemas.

Ejemplo 19. Determinar z, x_L, U, U_a, U_L, S, P, Q, si $I = 6$ A, $R = 3\Omega$, $\cos\varphi = 0{,}8$. La corriente se atrasa de la tensión.

Del triángulo de impedancia

$$\cos\varphi = \frac{R}{z},$$

de donde

$$z = \frac{R}{\cos\varphi} = \frac{3}{0{,}8} = 3{,}75\Omega.$$

$$U = I \cdot z = 6 \cdot 3{,}75 = 22{,}5 \text{ V}.$$

$$x_L = \sqrt{z^2 - R^2} = \sqrt{3{,}75^2 - 3^2} = \sqrt{14{,}06 - 9} = \sqrt{5{,}06} = 2{,}24\Omega.$$

$$U_a = IR = 6 \cdot 3 = 18 \text{ V}.$$

$$U_L = Ix_L = 6 \cdot 2{,}24 = 13{,}45 \text{ V}.$$

$$S = IU = 6 \cdot 22{,}5 = 135 \text{ VA}.$$

$$P = I^2R = 36 \cdot 3 = 108 \text{ W},$$

o sea,

$$P = IU \cos \varphi = 6 \cdot 22{,}5 \cdot 0{,}8 = 108 \text{ W},$$

$$Q = IU_L = 6 \cdot 13{,}45 = 81 \text{ VAr},$$

o bien,

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{135^2 - 108^2} = \sqrt{6.561} = 81 \text{ VAr}$$

de donde, de la misma manera:

$$Q = I^2 x_L = 6^2 \cdot 2{,}24 = 81 \text{ VAr}.$$

§ 100. Necesidad de aumentar el «coseno fi» de los consumidores

Supongamos que en la central eléctrica está instalado un generador de corriente alterna monofásica de 240 kVA de potencia y de 1.200 V de tensión. La corriente que puede entregar a la red será

$$I = \frac{S}{U} = \frac{240.000}{1.200} = 200 \text{ A}.$$

Estudiemos el caso cuando al generador se conecta una carga que tiene sólo resistencia activa (aparatos eléctricos de calentamiento, lámparas de incandescencia). Puesto que en este caso toda la potencia que entrega el generador es activa, el cos φ es igual a la unidad.

La potencia activa del generador

$$P = IU \cos \varphi = 200 \cdot 1.200 \cdot 1 = 240.000 \text{ W} = 240 \text{ kW}.$$

Si ahora al mismo generador se le conecta una carga con cos φ = 0,8 (resistencia activa y reactancia inductiva), la potencia activa que entrega el generador a la red será:

$$P = IU \cos \varphi = 200 \cdot 1.200 \cdot 0{,}8 = 192.000 \text{ W} = 192 \text{ kW}.$$

La potencia activa del generador no está cargada por completo, aunque la corriente anterior de 200 A pase por su devanado calentándolo. No se puede aumentar la corriente del alternador por encima de 200 A, ya que esto es peligroso para los devanados del generador.

Si la carga tiene cos φ = 0,5, el generador entrega la potencia activa igual a

$$P = IU \cos \varphi = 200 \cdot 1.200 \cdot 0{,}5 = 120.000 \text{ W} = 120 \text{ kW}.$$

De este modo vemos, que cuanto menor es el cos φ del consumidor, tanta menor potencia activa entregará el generador, tanto menos estará cargado éste con potencia activa y tanto menor será el rendimiento de la máquina. Esto induce a tomar en cuenta no sólo la energía activa que el consumidor toma de la central eléctrica, sino también la energía reactiva. Por lo tanto, al consumidor que posee carga reactiva han de serle instalados contadores eléctricos de energía activa y reactiva (su estructura y funcionamiento están descritos en el capítulo XIV). Siendo constantes las potencias activa y reactiva, las energías activa y reactiva pueden ser determinadas

por las fórmulas:

$$A_a = Pt \text{ kWh};$$

$$A_r = Qt \text{ kVArh}.$$

Si el «coseno fi» del consumidor es pequeño ocasiona:

1. *La necesidad de aumentar la potencia total o aparente de las centrales eléctricas y transformadores.*

De la fórmula

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

se ve que

$$S = \frac{P}{\cos\varphi}.$$

Así, por ejemplo, si la potencia de los motores de un taller es igual a 80 kW y el cos φ de la red del taller es igual a 0,8, la potencia del transformador para alimentar los motores será:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{80}{0{,}8} = 100 \text{ kVA}.$$

Al disminuir el cos φ de la red del taller hasta 0,6, con la misma potencia de los motores, la potencia necesaria del transformador será:

$$S = \frac{80}{0{,}6} = 133 \text{ kVA}.$$

Si en el primer caso puede servir un transformador de 100 kVA, en el segundo es necesario emplear el de la siguiente clase con potencia de 180 kVA.

2. *La reducción del rendimiento de los generadores y transformadores.* Un generador o transformador que trabajan a la carga con «coseno fi» pequeño, pueden ser cargados suficientemente, en cuanto a la corriente, e insuficientemente, en lo que se refiere a la potencia activa. En las máquinas que trabajan con carga insuficiente, el rendimiento decae, lo que lleva al gasto excesivo de energía de los motores primarios (de turba o carbón, en las centrales térmicas; de combustible líquido, en los motores de combustión interna, etc.).

3. *El incremento de las pérdidas de la potencia y de la tensión en los conductores y al aumento de la sección de los mismos.* De la fórmula de potencia de corriente alterna monofásica tenemos:

$$P = IU\cos\varphi,$$

despejando I:

$$I = \frac{P}{U\cos\varphi}.$$

Así, por ejemplo, si la potencia $P = 1$ kW, $\cos\varphi = 0{,}9$ y la tensión $U = 200$ V

$$I = \frac{1.000}{200 \cdot 0{,}9} = 5{,}55 \text{ A}.$$

Pero si $\cos \varphi = 0.6$

$$I = \frac{1.000}{200 \cdot 0,6} = 8.35 \text{ A.}$$

De este modo, siendo invariables los valores de la potencia y de la tensión, la disminución del cos φ va acompañada del aumento de la corriente en los conductores y, por consiguiente, por el incremento de las pérdidas por calentamiento (I^2R). Para evitar el calentamiento peligroso al aumentar la corriente, es necesario hacer más grande la sección del conductor. Además, el incremento de la corriente en los conductores, cuando su sección es invariable, trae el aumento de la caída de tensión en éstos.

§ 101. Causas que influyen sobre la magnitud del «coseno fi» del consumidor y medidas que se adoptan para aumentar el «coseno fi»

A. Causas de un «coseno fi» pequeño. 1. *Carga insuficiente de los motores eléctricos de corriente alterna.* Si un motor eléctrico es cargado insuficientemente, la potencia activa que consume disminuye proporcionalmente a la carga. Al mismo tiempo, la potencia reactiva cambia menos. Por eso a menor carga del motor, a menor factor de potencia trabaja éste.

Así, por ejemplo, un motor asincrónico de 400 kW a 1.000 r. p. m. tiene un «coseno fi» igual a 0,83, siendo completa la carga. Si la carga constituye 3/4 partes de la completa, el mismo motor tiene $\cos \varphi = 0,8$. Si la carga es igual a 1/2 de la completa, $\cos \varphi = 0,7$, y si es igual a 1/4 parte, $\cos \varphi = 0,5$.

Los motores que trabajan en vacío tienen un «coseno fi» de 0,1 a 0,3 en dependencia de la clase, potencia y velocidad de rotación.

2. *Elección incorrecta del tipo de motor eléctrico.* Los motores de alta velocidad y gran potencia poseen mayor «coseno fi» que los de la baja velocidad y potencia. Los motores cerrados tienen cos φ más bajo que los abiertos. Los motores escogidos incorrectamente, según el tipo, potencia y velocidad, disminuyen el cos φ.

3. *Aumento de la tensión en la red.* En las horas de cargas pequeñas, de refacción, etc., la tensión de la red en la empresa aumenta en varios voltios. Esto lleva al incremento de la corriente de magnetización de los consumidores inductivos (de la componente reactiva de su corriente total), lo que a su vez provoca la disminución del cos φ de la empresa.

4. *Reparación incorrecta de los motores.* A veces, debido a la selección incorrecta del cable, durante el cambio del devanado de los motores eléctricos, las ranuras de las máquinas resultan rellenadas de una cantidad diferente de conductores de los de la fábrica. Durante el funcionamiento de semejante motor, aumenta el flujo magnético de dispersión, lo que conduce a la disminución del cos φ del motor.

Si los cojinetes están demasiado desgastados, el rotor del motor

al girar puede rozar el estator. En vez de sustituir los cojinetes, el personal que sirve la máquina acude a veces a un procedimiento incorrecto y perjudicial: el de someter el rotor a un nuevo torneado.

El aumento del entrehierro entre el rotor y el estator origina el incremento de la corriente de magnetización y la disminución del cos φ del motor.

B. Métodos para aumentar el «coseno fi». Las consecuencias enumeradas más arriba de un cos φ bajo evidencian con suficiente elocuencia que es necesario procurar un cos φ alto. Las medidas para aumentar el cos φ son:

1. *Selección justa del tipo, potencia y velocidad de los motores que se instalan.*
2. *Aumento de la carga de los motores.*
3. *Inadmisibilidad del trabajo prolongado en vacío de los motores.*
4. *Reparación correcta y de alta calidad de los motores.*
5. *Empleo de condensadores estáticos* (es decir, fijos, no rotativos).

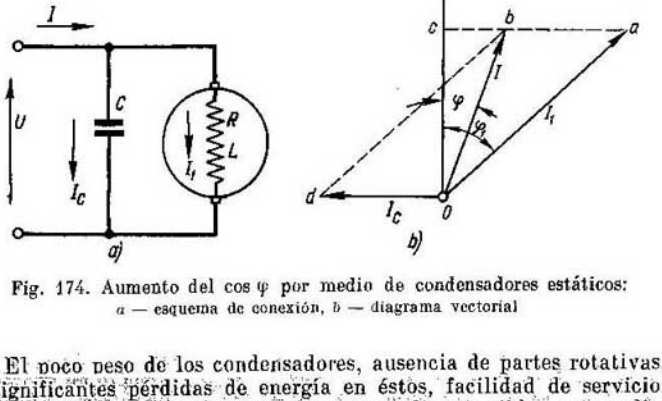


Fig. 174. Aumento del cos φ por medio de condensadores estáticos: *a* — esquema de conexión, *b* — diagrama vectorial

El poco peso de los condensadores, ausencia de partes rotativas, insignificantes pérdidas de energía en éstos, facilidad de servicio, seguridad y precisión en su funcionamiento, hace posible usar ampliamente los condensadores estáticos para aumentar el cos φ de los motores.

Al seleccionar la magnitud de la capacidad, en caso de conexión en paralelo de una inductancia y una capacidad, es posible conseguir la disminución del ángulo de desfasamiento entre la tensión y la corriente común, siendo invariable la potencia activa y reactiva que consume la derivación con inductancia. Este ángulo se puede reducir a cero. Entonces la corriente que fluye por el sector común

del circuito tendrá magnitud mínima y coincidirá en fase con la tensión de la red.

Este fenómeno se denomina *compensación de desfasamiento* y se utiliza ampliamente en la práctica.

Por consideraciones económicas no es ventajoso reducir el ángulo φ hasta cero, prácticamente conviene tener cos $\varphi \approx 0{,}9 - 0{,}95$.

Veamos el cálculo de la capacidad de los condensadores que hace falta conectar en paralelo a la carga inductiva para aumentar el cos φ hasta la magnitud dada.

En la fig. 174,*a* está representado el esquema de conexión de una carga inductiva a la red de corriente alterna. Para aumentar el factor de potencia, se ha conectado en paralelo al consumidor una batería de condensadores. El diagrama vectorial comienza con el trazado del vector de la tensión U. La corriente I_1, debido al carácter inductivo de la carga, está atrasada con respecto a la tensión de la red en un ángulo φ_1. Es necesario disminuir el ángulo de desfasamiento entre la tensión U y la corriente común hasta la magnitud φ *.

El segmento *oc* que representa la componente activa de la corriente I_1 es igual a:

$$oc = I_1 \cos \varphi_1 = oa \cos \varphi_1.$$

Aplicando la expresión de la potencia de la corriente alterna

$$P = UI \cos \varphi,$$

representemos el segmento *oc* del modo siguiente:

$$oc = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{P}{U}.$$

La corriente I en el sector común del circuito es igual a la suma geométrica de la corriente de carga I_1 y la corriente del condensador I_C.

De los triángulos *oac* y *obc* tenemos:

$$ac = oc \operatorname{tg} \varphi_1;$$
$$bc = oc \operatorname{tg} \varphi.$$

Del diagrama obtenemos:

$$ab = od = ac - bc = oc \operatorname{tg} \varphi_1 - oc \operatorname{tg} \varphi = oc (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi).$$

Puesto que $oc = P/U$ y $ab = I_C$, entonces

$$I_C = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi).$$

Al mismo tiempo, como fue indicado anteriormente,

$$I_C = U \omega C.$$

---

* En otras palabras, aumentar el factor de potencia desde el valor cos φ_1 hasta el valor del cos φ.

Por consiguiente,

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi).$$

Ejemplo 20. Los motores eléctricos de un pozo de una mina consumen 2.000 kW de potencia, siendo la tensión de 6 kV y $\cos \varphi_1 = 0{,}6$. Es necesario determinar la capacidad de los condensadores que hace falta intercalar a las barras de la instalación para aumentar el $\cos \varphi$ hasta 0,9, siendo $f = 50$ Hz.

Solución.

$$\cos \varphi_1 = 0{,}6; \quad \varphi_1 = 53°10'; \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = 1{,}335;$$
$$\cos \varphi = 0{,}9; \quad \varphi = 25°50'; \quad \operatorname{tg} \varphi = 0{,}484;$$

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314 \frac{1}{\text{seg}};$$

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi) = \frac{2.000.000}{314 \cdot 6.000^2} (1{,}335 - 0{,}484) = 0{,}00015 \text{ F} = 150 \ \mu F.$$

Problemas

1. Determinar la frecuencia de la corriente alterna obtenida de un generador con 24 polos, si el rotor gira a 250 r.p.m.
2. Un alternador de veinte polos genera una corriente de 50 Hz de frecuencia. Determinar el número de revoluciones por minuto del rotor del alternador.
3. Determinar el número de polos de un alternador, si la velocidad de rotación de su rotor es igual a 300 r.p.m. y la frecuencia de corriente, a 50 Hz.
4. Una bobina está intercalada a la red de corriente alterna monofásica de 120 V de tensión; la f.e.m. de autoinducción es igual a 100 V. ¿Cuál es la caída activa de tensión?
5. ¿Cuál es la indicación del voltímetro conectado a los bornes del devanado de un electroimán, si la reactancia inductiva del devanado es igual a 6Ω, la resistencia activa a 8Ω, y la corriente que pasa por las espiras del devanado es igual a 5 A?
6. Cuando una bobina fue conectada a la red de corriente continua de 120 V de tensión, el amperímetro indicó una corriente de 4 A; cuando la misma bobina fue conectada a la red de corriente alterna de 380 V de tensión, el amperímetro indicó 5 A. Determinar la impedancia, la resistencia activa y la reactancia inductiva de la bobina.
7. Dos conductores con resistencia activa de 6 y 5Ω y reactancia inductiva de 3 y 8Ω están conectados en serie. ¿Qué tensión hace falta aplicar para que en el circuito pase una corriente de 4 A?
8. Por un conductor con resistencia activa de 7Ω y reactancia inductiva de 5Ω pasa una corriente de 6 A. En paralelo al primer conductor está conectado otro con $R = 2\Omega$ y $x_L = 4\Omega$. Determinar la corriente en el segundo conductor.
9. Un motor eléctrico monofásico conectado a la red de 120 V consume una corriente de 2 A. El factor de potencia del motor es de 0,85. Determinar las potencias activa y total que el motor consume de la red.
10. En un tablero de distribución están instalados tres instrumentos: amperímetro, voltímetro y vatímetro. La indicación del amperímetro es 40 A, del voltímetro, 110 V, del vatímetro, 4 kW. Determinar z, R, x_L, S, $\cos \varphi$, Q, U_L, U_a, si la carga es de carácter inductivo.
11. Determinar la corriente que consume un motor monofásico de 5 kW de potencia, si está conectado a la red de 120 V, y su factor de potencia es igual a 0,8.

12. En una central eléctrica está montado un generador monofásico de 200 kVA de potencia y 100 V de tensión. Determinar la potencia activa que el alternador entrega a la red, si el factor de potencia es igual a 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2.

13. A través de una bobina de inducción con $\cos \varphi = 0{,}3$ pasó una corriente alterna de 10 A. El vatímetro que mide la potencia de la bobina indicó 250 W. Determinar la tensión en los bornes de la bobina, impedancia, resistencia activa y reactancia inductiva.

14. Una bobina de inducción está conectada a una red de corriente continua de 12 V de tensión y consume una corriente de 8 A. La misma corriente es consumida por la bobina al conectarla a una red de corriente alterna de 20 V de tensión. Determinar la resistencia activa, reactancia inductiva y la impedancia de la bobina; las potencias total, activa y reactiva.

15. Las indicaciones de los instrumentos son: del amperímento, 20 A; del voltímetro, 120 V; del fasímetro, 0,8. Determinar S, P, Q, z, R, x_L, U_L, U_a.

16. La potencia útil en el árbol de un motor monofásico es de 10 CV, el rendimiento del motor, 85%; $\cos \varphi = 0{,}8$; la tensión, 220 V. Determinar la potencia del alternador que alimenta este motor, si la energía se transmite por una línea de 50 m con un conductor de cobre de 16 mm² de sección. La reactancia inductiva de los conductores se puede despreciar.

17. Las indicaciones de los instrumentos son: del amperímetro, 8 A; del voltímetro, 220 V; la resistencia activa de la bobina es igual a 15Ω. Determinar P, S, Q, z, x_L, $\cos \varphi$, U_L, U_a del consumidor.

18. El certificado de un motor monofásico lleva inscrito: $U = 120$ V, $I = 5$ A, $\cos \varphi = 0{,}8$. Determinar la resistencia activa, reactancia inductiva y la impedancia del devanado del motor.

19. A una red de corriente monofásica está conectada una bobina con núcleo de acero dulce. Al circuito de la bobina están intercalados un voltímetro, amperímetro y vatímetro. La indicación del amperímetro es 5 A, del voltímetro, 120 V y del vatímetro, 200 W. La resistencia activa de la bobina es de 2Ω. Determinar el factor de potencia de la bobina, la magnitud de la f.e.m. de autoinducción, la pérdida de potencia en el devanado de la bobina, así como en el núcleo.

20. Una bobina de choque (es decir, una bobina con núcleo de acero) con factor de potencia 0,2 conectada a una red de 60 V, consume una corriente de 3 A. La resistencia activa de la bobina es de 2Ω. Determinar la magnitud de la f.e.m. de autoinducción en la bobina y la pérdida de potencia en el devanado y en el núcleo.

Preguntas de control

1. ¿Cómo se obtiene la corriente alterna?
2. ¿Qué es ciclo y frecuencia de corriente alterna?
3. ¿Cómo determinar la frecuencia, si se sabe el número de polos y la velocidad de rotación del generador de corriente alterna?
4. ¿Cuáles son los efectos de la corriente alterna?
5. ¿En qué se expresan los efectos de una inductancia conectada sobre circuito de corriente alterna?
6. ¿Qué es la resistencia activa y la reactancia inductiva?
7. ¿Qué es el factor de potencia?
8. ¿Cómo medir la potencia activa y aparente (total) de la corriente alterna?
9. ¿Cómo se manifiesta una capacidad conectada al circuito de corriente alterna?
10. ¿Qué medidas se adoptan para aumentar el «coseno fi»?
11. ¿Qué es el valor eficaz de la corriente alterna?
12. ¿Qué es la resonancia de tensiones?
13. ¿Qué es la resonancia de corrientes?

VIII

CORRIENTE ALTERNA TRIFASICA

§ 102. Corrientes polifásicas

Se llama s i s t e m a p o l i f á s i c o el conjunto de f.e.m. alternas (corrientes, tensiones, etc.) de una frecuencia y desfasadas una con respecto a otra en ciertos ángulos. Si las amplitudes de las f.e.m. separadas son iguales y las f.e.m. están desfasadas una con respecto a otra en ángulos iguales a $2\pi/m$ (donde m es el número de fases), tal sistema se llama *sistema polifásico simétrico*.

Cada f.e.m. puede actuar en su circuito independiente y no estar ligada con otras f.e.m. Tal sistema se llama i n d e p e n d i e n t e.

El circuito monofásico que forma parte del circuito polifásico dado se llama f a s e. Las fases de un sistema independiente no están concatenadas eléctrica y magnéticamente entre sí, en su funcionamiento no dependen una de otra, y se pueden calcular por las fórmulas de los circuitos de corriente monofásica.

El inconveniente del sistema polifásico independiente radica en el gran número de conductores igual a $2m$. Así, por ejemplo, para transportar la energía por un sistema trifásico se necesitarán 6 conductores.

Un sistema polifásico en el cual las fases están concatenadas entre sí eléctricamente se llama s i s t e m a p o l i f á s i c o c o n c a t e n a d o. Los sistemas concatenados se emplean ampliamente en la práctica.

La corriente polifásica presenta grandes ventajas: primero, para transmitir la misma potencia con una corriente polifásica se necesita menor sección de los conductores que con una corriente monofásica; segundo, crea una campo magnético giratorio, por medio de bobinas o devanados fijos, que se utiliza en el trabajo de los motores y diversos instrumentos de corriente alterna.

§ 103. Corriente alterna trifásica

De los sistemas de corriente polifásica la que más amplia aplicación ha encontrado en la práctica es la corriente alterna trifásica.

La corriente alterna trifásica se obtiene del modo siguiente. Si en un campo magnético homogéneo de polos *NS* (fig. 175) alojamos tres espiras disponiéndolas a 120° una respecto a otra, y hacemos

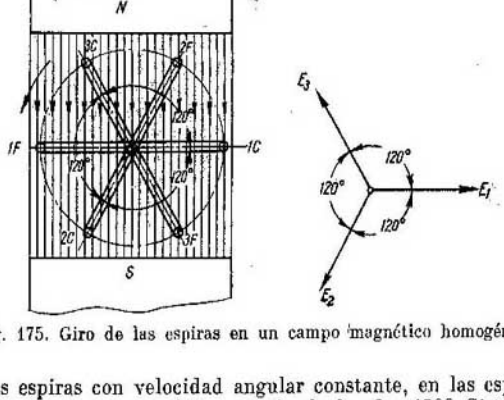


Fig. 175. Giro de las espiras en un campo magnético homogéneo

girar las espiras con velocidad angular constante, en las espiras se inducirán f.e.m. que también estarán desfasadas 120°. Si tomamos la fase inicial de la primera espira igual a cero, las f.e.m. en las espiras se expresarán con las siguientes ecuaciones:

$$e_1 = E_{m_1} \operatorname{sen} \omega t;$$
$$e_2 = E_{m_2} \operatorname{sen} (\omega t - 120°);$$
$$e_3 = E_{m_3} \operatorname{sen} (\omega t - 240°).$$

En la fig. 175, a la derecha, está representado el diagrama vectorial de las f.e.m. de las tres espiras. Como ha sido indicado más arriba, la longitud de los vectores es igual al valor eficaz de la f.e.m. En la práctica para obtener una corriente trifásica, en el estator de un alternador se colocan tres devanados desplazados en 120° uno respecto a otro. Estos se llaman devanados de fase o simplemente fases del alternador.

En la fig. 176, a la izquierda, está representado esquemáticamente un alternador bipolar de corriente trifásica. El estator de la máquina lleva tres devanados con igual número de espiras, desplazados 120° (para una máquina bipolar). Las letras *A*, *B* y *C* indican el comienzo de los devanados; las letras *X*, *Y* y *Z*, sus extremos finales. El campo magnético se crea por el devanado en el rotor. A través de las escobillas y anillos se suministra a los terminales de este devanado la tensión de un generador especial de corriente continua o de un rectificador. El rotor del alternador se pone en rotación mediante un motor primario (turbina de vapor, turbina hidráulica, motor de

combustión interna, etc.); su campo magnético interseca los devanados del estator y en éstos se inducen f. e. m. sinusoidales.

En la misma figura, a la derecha, se muestran las curvas de variación de las f.e.m. inducidas en los tres devanados. La posición en la cual está mostrado el rotor en la parte izquierda de la figura, se indica en la parte derecha con la línea ae_1. En ese momento la bobina *I* se encuentra sobre los centros de los polos del electroimán, la magnitud de la f.e.m. inducida en ésta es máxima y está orientada de acuerdo con «la regla de la mano derecha» desde el extremo final de la bobina hacia su comienzo. La f. e. m. en la bobina *II* está atrasada de la f.e.m. en la bobina *I* en 1/3 ciclo y la f. e. m. en la bobina *III* está atrasada de la f.e.m. en la bobina *II* también en 1/3 ciclo.

Las bobinas *II* y *III* se encuentran en la zona de acción del polo sur del electroimán del rotor, por eso las f. e. m. inducidas en estas bobinas están dirigidas desde su comienzo hacia el extremo final.

Tres sinusoides iguales a las que se dan en la fig. 176 pueden ser obtenidas haciendo girar tres vectores a escala que representan la magnitud máxima de las f. e. m. en las bobinas del estator del alternador y desfasadas 120° una con respecto a otra (fig. 177).

Todo lo expuesto más arriba sobre las fuerzas electromotrices se refiere también a las corrientes y tensiones. De acuerdo con la definición general establecida anteriormente, señalemos que el sistema de tres f.e.m. alternas de la misma frecuencia y amplitud, desfasadas una respecto a otra 120° $\left(\frac{2\pi}{3}\right)$ se llama **sistema trifásico simétrico.**

Los devanados de fase del generador tienen igual número de espiras y se hacen de conductores de igual sección. Las f.e.m. inducidas en estos devanados serán iguales en magnitud. Si cada una de las tres fases del generador trabaja a carga independiente (fig. 178) tendremos un sistema trifásico independiente. En este caso el generador está unido al consumidor mediante seis conductores. La corriente que pasa por la fase, de acuerdo con la ley de Ohm es igual a:

$$I_f = \frac{U_f}{z_f},$$

donde I_f = corriente de fase;

U_f = tensión del devanado de fase del generador;

z_f = resistencia total de fase del consumidor.

El sistema independiente de corriente trifásica prácticamente no se emplea.

Los devanados de fase de los generadores y consumidores de corriente trifásica (motores, transformadores, etc.) se conectan según el esquema en estrella o en triángulo (delta).

Hay que señalar, que el ingeniero ruso Dolivo-Dobrovolsky contribuyó con sus obras (1888) a la implantación rápida de la corriente trifásica y a su difusión amplia en la práctica.

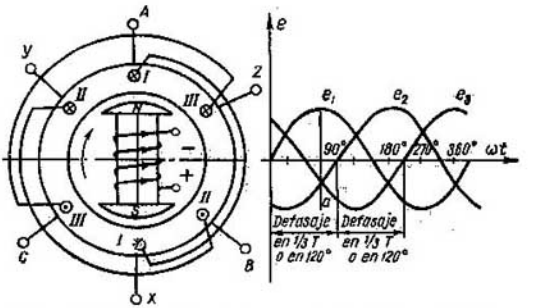


Fig. 176. Obtención de la corriente alterna trifásica

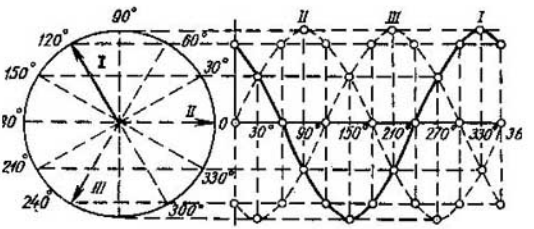


Fig. 177. Trazado de tres sinusoides desfasadas 120°, haciendo girar tres vectores dispuestos a 120°

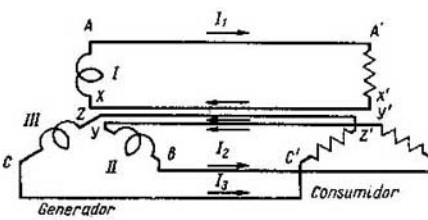


Fig. 178. Sistema hexafilar de corriente trifásica

§ 104. Conexión en estrella

Si los devanados de fase de un generador o consumidor se conectan de modo que los finales de los devanados se unan en un punto común, y los comienzos de éstos sean conectados a los conductores de la línea, tal conexión se llama conexión en estrella y se designa

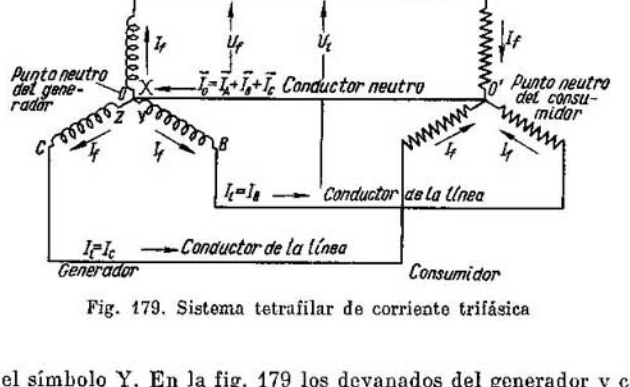


Fig. 179. Sistema tetrafilar de corriente trifásica

con el símbolo Y. En la fig. 179 los devanados del generador y consumidor están conectados en estrella. Los puntos en los cuales están unidos los terminales de los devanados de fase del generador o del consumidor, se llaman correspondientemente puntos neutros del generador (0) y del consumidor (0'). Ambos puntos 0 y 0' están unidos con un conductor que se llama conductor neutro o hilo central. Los otros tres conductores del sistema trifásico que van del generador al consumidor se llaman conductores de la línea. De este modo, el generador está unido con el consumidor mediante cuatro conductores. Por eso, dicho sistema se llama sistema tetrafilar de corriente trifásica.

Comparando los sistemas de la corriente trifásica independiente (fig. 178) y de cuatro conductores (fig. 179), vemos que en el primer caso el papel de conductor de vuelta lo ejecutan tres conductores del sistema, y, en el segundo, el conductor neutro. Durante el servicio, por el conductor neutro pasa una corriente igual a la suma geométrica de tres corrientes: I_A, I_B e I_C, es decir, $\bar{I}_0 = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$.

Las tensiones medidas entre los comienzos de las fases del generador o consumidor y el punto neutro o conductr neutro se llaman tensiones de fase y se designan con U_A, U_B, U_C o en forma general con U_f. A menudo se establecen de antemano las

magnitudes de las f.e.m. de los devanados de fase del generador, designándose éstas con E_A, E_B, E_C o E_f. Si despreciamos las resistencias de los devanados del generador, se puede escribir:

$$E_A = U_A; \qquad E_B = U_B; \qquad E_C = U_C; \qquad E_f = U_f.$$

Las tensiones medidas entre los comienzos de las fases A y B, B y C, C y A del generador o consumidor se llaman tensiones compuestas y se designan con U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} o en forma general, con U_{comp}. Las flechas trazadas en la fig. 179 muestran que fue elegida la dirección positiva de la corriente, que en los conductores de la línea se considera desde el generador hacia el consumidor, y en el conductor neutro, desde el consumidor hacia el generador.

Si conectamos los bornes del voltímetro a los puntos A y B, éste indicará la tensión compuesta U_{AB}. Puesto que las direcciones positivas de las tensiones de fase U_A, U_B y U_C están elegidas desde los comienzos de los devanados de fase hacia sus extremos finales, el vector de tensión compuesta U_{AB} será igual a la diferencia geométrica entre los vectores de las tensiones de fase U_A y U_B:

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B.$$

Análogamente se puede escribir:

$$\bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C;$$

$$\bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A.$$

Se puede decir, de otro modo, que el valor instantáneo de la tensión compuesta es igual a la diferencia entre los valores instantáneos de las tensiones de fase correspondientes. En la fig. 180 la sustracción de los vectores está sustituida por su suma:

$$U_A \text{ y } -U_B; \qquad U_B \text{ y } -U_C; \qquad U_C \text{ y } -U_A.$$

En el diagrama vectorial se ve que los vectores de las tensiones compuestas forman un triángulo cerrado.

La relación entre las tensiones compuesta y de fase está expuesta en la fig. 181:

$$U_{BC} = 2U_B \cos 30°,$$

puesto que

$$\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ entonces}$$

$$U_{BC} = \sqrt{3}U_B,$$

o en general

$$U_{comp} = \sqrt{3}U_f.$$

Por consiguiente, en caso de conexión en estrella la tensión compuesta es $\sqrt{3}$ veces mayor que la de fase.

En lo sucesivo, hablando de tensión en los circuitos de corriente alterna trifásica, tendremos en cuenta la tensión compuesta, excepto los casos especialmente estipulados.

La corriente que pasa por un devanado de fase del generador o consumidor se llama **corriente de fase** y se designa en

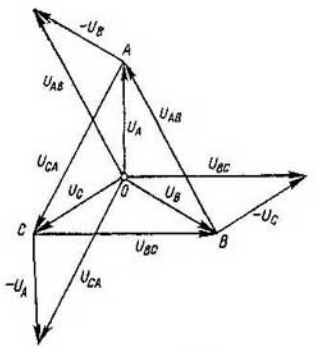


Fig. 180. Tensiones de fase y compuestas conectadas en estrella

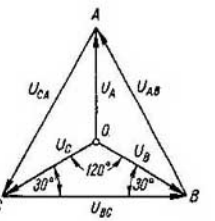


Fig. 181. Relación entre las tensiones de fase y compuestas, siendo la conexión en estrella

forma general con I_f. La corriente que pasa por un conductor de la línea se llama **corriente de la línea** y se designa en forma general con I_l.

De la fig. 179 se ve que, en caso de conexión en estrella, la corriente de la línea es igual a la de fase, o sea $I_l = I_f$.

Estudiemos el caso cuando la carga de fases del consumidor es igual, tanto en magnitud, como en carácter. Tal carga se llama **equilibrada o simétrica**. Esta condición se expresa por la igualdad:

$$z_1 = z_2 = z_3.$$

La carga no estará equilibrada, si $z_1 = R_1 = 5\Omega$; $z_2 = \omega L_2 = 5\Omega$ y $z_3 = \frac{1}{\omega C_3} = 5\Omega$, ya que aquí se observa solamente una condición: igualdad de las resistencias de fases del consumidor en magnitud, mientras que el carácter de éstas es diferente (R_1 es resistencia activa; $x_2 = \omega L_2$ es reactancia inductiva; $x_3 = \frac{1}{\omega C_3}$ es reactancia capacitiva).

$$I_A = \frac{U_A}{z_A}; \qquad I_B \frac{U_B}{z_B}; \qquad I_C = \frac{U_C}{z_C};$$

$$I_A = I_B = I_C.$$

Los factores de potencia de fase serán iguales, debido a la igualdad de las resistencias y de su carácter:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_A}{z_A}; \qquad \cos \varphi_2 = \frac{R_B}{z_B}; \qquad \cos \varphi_3 = \frac{R_C}{z_C};$$

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \cos \varphi_3.$$

Si suponemos que las resistencias de los conductores, que unen el generador con el consumidor (de los conductores de la línea), son nulas, la tensión en los bornes del consumidor será igual a la tensión en los bornes del generador. Añadiendo a la tensión del generador, la caída de tensión en sus devanados de fase obtenemos las f.e.m. de fase del generador.

En la fig. 182 se da el diagrama vectorial de corrientes, tensiones y f.e.m. en caso de conexión en estrella.

Ya sabemos que en el conductor neutro ha de fluir la suma geométrica de corrientes de las tres fases. En la fig. 183 se muestran las curvas de variación de las corrientes en caso de carga equilibrada de un sistema trifásico. Puesto que la carga es equilibrada, los valores máximos para las tres sinusoides de corriente serán iguales.

Tomemos el momento *a* y sumemos los valores instantáneos de las corrientes de las tres fases para obtener la corriente en el conductor neutro. En ese instante la corriente de la tercera fase i_3 es nula. El valor instantáneo de la corriente en la primera fase es igual a i_1 y ésta circula en una dirección. Al mismo tiempo la corriente en la segunda fase es igual a i_2, pero ésta tiene dirección contraria. Puesto que la corriente i_1 es igual a la corriente i_2, pero tiene dirección contraria, y la corriente i_3 es nula, la suma de las corrientes es también igual a cero.

La suma de las tres corrientes será igual a cero en el momento *c*.

En el momento *b* la corriente de la primera fase tendrá un valor máximo positivo i_1. Al mismo tiempo las corrientes de las fases segunda y tercera, i_2 e i_1, que son iguales entre sí, tienen dirección negativa y su suma es igual a la corriente i_1. Por eso la suma de las tres corrientes es de nuevo igual a cero.

Al estudiar cualquier otro instante veremos también, que la suma de los valores instantáneos de las corrientes de un sistema trifásico es igual a cero en caso de carga equilibrada. Por consiguiente, la corriente en el conductor neutro será nula. Despreciando el conductor neutro en un sistema tetrafilar, pasamos a un sistema trifilar de corriente trifásica, el cual está representado esquemáticamente en la fig. 184. De este modo, si tenemos una carga equilibrada, como, por ejemplo, en los motores trifásicos de corriente alterna, hornos

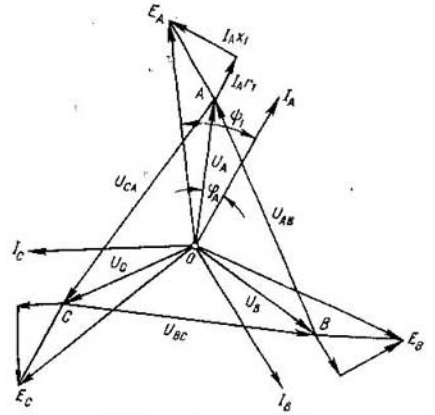


Fig. 182. Diagrama vectorial de corrientes y tensiones con conexión en estrella

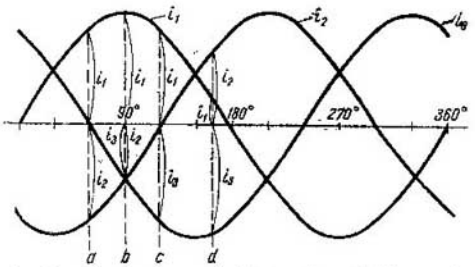


Fig. 183. Determinación de la corriente en el conductor neutro, estando la carga equilibrada en las tres fases del consumidor

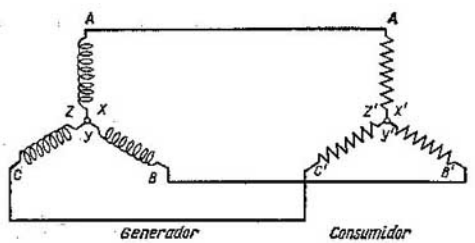


Fig. 184. Sistema trifilar de corriente trifásica

trifásicos, etc., a una carga semejante se conectan sólo tres conductores.

Los consumidores conectados en estrella con carga de fases desequilibrada necesitan un conductor neutro. A tales consumidores, como, por ejemplo, una carga de alumbrado, se conducen cuatro conductores.

Ejemplo 1. Se da un consumidor cuyas resistencias de fases son iguales a: $z_A = 5\Omega$; $z_B = 10\Omega$; $z_C = 20\Omega$. El consumidor unido en estrella está conectado a una red de 380 V de tensión. Determinar la corriente en el conductor neutro, si los factores de potencia de las fases son iguales y el carácter de carga por las fases es también igual.

Solución.

Primero determinamos las corrientes de fase:

$$I_A = \frac{U_A}{z_A} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 5} = \frac{220}{5} = 44 \text{ A};$$

$$I_B = \frac{U_B}{z_B} = \frac{220}{10} = 22 \text{ A};$$

$$I_C = \frac{U_C}{z_C} = \frac{220}{20} = 11 \text{ A}.$$

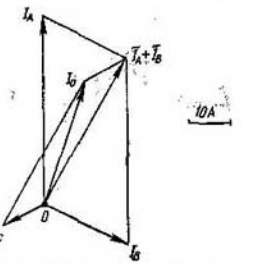


Fig. 185. Determinación de la corriente en el conductor neutro por el método geométrico

Puesto que las corrientes están desfasadas 120°, para trazar el diagrama vectorial de un punto trazamos tres direcciones a 120° (fig. 185). Sobre estas direcciones marcamos a escala las magnitudes de las corrientes I_A, I_B, I_C.

Sumando geométricamente las corrientes de fase, hallamos la corriente en el conductor neutro I_0. En nuestro caso esta corriente resulta igual a 31 A.

Los vectores de las f.e.m. de los devanados del alternador representan un sistema simétrico: son iguales en magnitud y desfasados 120° uno respecto a otro.

El punto neutro del alternador en el diagrama vectorial está situado en el centro de la estrella de las f.e.m. de fase. El punto neutro del consumidor conectado en estrella, estando la carga equilibrada, lo mismo que si está desequilibrada, pero haciendo un conductor neutro de resistencia bastante pequeña, se encuentra en el centro de gravedad del triángulo de tensiones compuestas. La ruptura del conductor neutro durante el trabajo del consumidor trifásico con carga desequilibrada trae consigo la redistribución de las corrientes y tensiones. Vamos a detenernos más detalladamente en esta cuestión.

Supongamos que hay un consumidor trifásico (fig. 186,*a*) con carga activa de fases desequilibradas. Aceptemos la relación de las resistencias de fases del consumidor igual a $R_A : R_B : R_C = 1 : 2 : 3$. Se necesita determinar la posición del punto neutro del consumidor.

Al poner en cortocircuito la fase A (fig. 186,*b*) ($R_A = 0$), el punto neutro O' coincidirá con el punto A del diagrama vectorial (fig.

186, *d*). En este caso la tensión en las dos fases restantes *B* y *C* aumentará $\sqrt{3}$ veces, ya que éstas estarán conectadas entre los conductores de la línea. Al abrir la fase *A* ($R_A = \infty$), las resistencias de las fases, R_B y R_C, quedarán conectadas en serie entre los conductores de la línea *B* y *C*. El punto neutro del consumidor se encontrará en el lado *BC* del triángulo de tensiones compuestas en el punto *D*

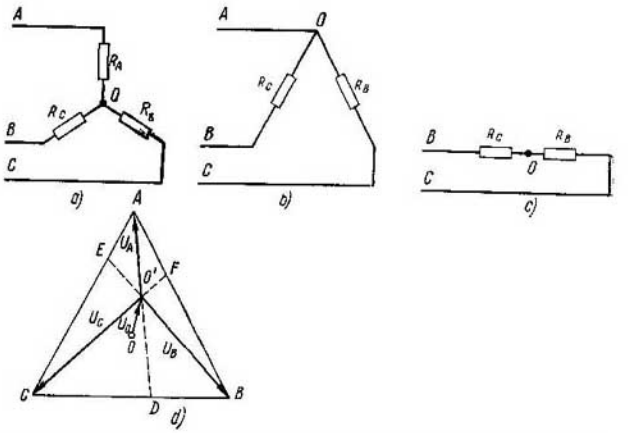


Fig. 186. Determinación de la posición del punto neutro del consumidor

que divide el lado *BC* en la relación $R_B : R_C = 2 : 3$. Se puede demostrar, que al variar la resistencia de fase *A* desde $R_A = 0$ hasta $R_A = \infty$, el punto neutro del consumidor se desplazará por la línea que une los puntos *A* y *D*.

Si razonamos análogamente para la fase *B* y, después, para la fase *C*, obtenemos dos líneas más: *BE*, obtenida al poner en cortocircuito y abrir la fase *B*, y *CF*, obtenida al poner el cortocircuito y abrir la fase *C*. La línea *BE* divide el lado *AC* del triángulo en la relación $R_A : R_C = 1 : 3$. La línea *CF* divide el lado *AB* del triángulo en la relación $R_A : R_B = 1 : 2$.

El punto de intersección de las líneas *AD*, *BE* y *CF* es el punto neutro del consumidor *O'* para la carga dada.

Es evidente que para determinar la posición del punto neutro es suficiente examinar los casos de cortocircuito y de abertura de dos fases cualesquiera.

Los vectores $\overline{O'A}$, $\overline{O'B}$, $\overline{O'C}$ representan las tensiones en las fases del consumidor. Como se ve del diagrama, en caso de carga

desequilibrada las tensiones de fase del consumidor son diferentes en magnitud y, además, la magnitud de la tensión de fase es proporcional a la resistencia de la fase.

El desplazamiento del punto neutro del consumidor, que tiene lugar debido a la carga desequilibrada, conduce a un fenómeno indeseable en las redes de alumbrado. Cuanto mayor es el número y la potencia de las lámparas conectadas en la fase, tanto menor será su resistencia, tanto menor será su tensión de fase, tanto menor será su incandescencia.

El punto neutro de la estrella del consumidor puede estar en el interior del triángulo de tensiones compuestas, coincidir con uno de sus vértices, encontrarse en uno de sus lados y en algunos casos estar fuera del triángulo.

Entre los puntos neutros del alternador y del consumidor, en caso de carga desequilibrada, existe una diferencia de potencial $OO' = U_0$ (tensión de desplazamiento de la línea neutra).

Hemos visto los fenómenos que tienen lugar en caso de carga desequilibrada de fases del consumidor conectado en estrella sin conductor neutro. Al introducir un conductor neutro se evitan todos los inconvenientes producidos por la carga desequilibrada de fases. La carga de alumbrado, conectada en estrella, siempre exige un conductor neutro, ya que inclusive una carga equilibrada de las fases no garantiza en cierto momento su constancia para un plazo prolongado.

§ 105. Conexión en triángulo

Los generadores o consumidores de corriente trifásica pueden conectarse no sólo en estrella, sino también en triángulo.

En la fig. 187 se muestra un sistema trifásico independiente. Reuniendo por pares los conductores de un sistema independiente hexafilar y uniendo las fases, pasamos a un sistema trifásico trifilar conectado en triángulo.

Como se ve en la fig. 188, la conexión en triángulo se ejecuta de modo que el extremo final de la fase A esté unido al comienzo de la fase B, el extremo final de la fase B, al comienzo de la fase C y el extremo final de la fase C, al comienzo de la fase A. A los lugares de conexión de las fases se conectan conductores de la línea.

Si los devanados del generador están conectados en triángulo, como se ve en la fig. 188, cada devanado de fase crea tensión compuesta. El consumidor conectado en triángulo tiene la tensión compuesta conectada a los bornes de la resistencia de fase. Por consiguiente, en caso de conexión en triángulo la tensión de fase es igual a la compuesta.

$$U_{comp} = U_f$$

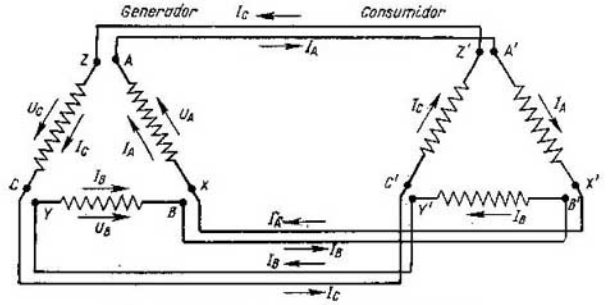


Fig. 187. Sistema trifásico independiente

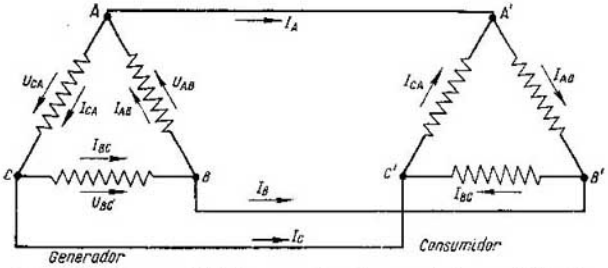


Fig. 188. Sistema trifásico concatenado conectado en triángulo

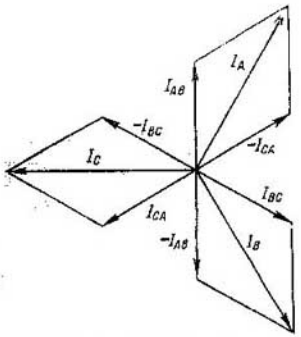


Fig. 189. Corrientes de fase y de la línea, con conexión en triángulo

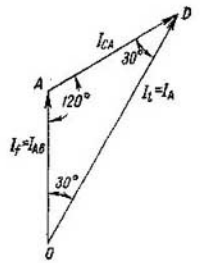


Fig. 190. Relación entre las corrientes de fase y de la línea, con conexión en triángulo

Determinemos la relación entre las corrientes de fase y de la línea en caso de conexión en triángulo, si la carga de fases es igual por su magnitud y carácter. Establezcamos las ecuaciones de las

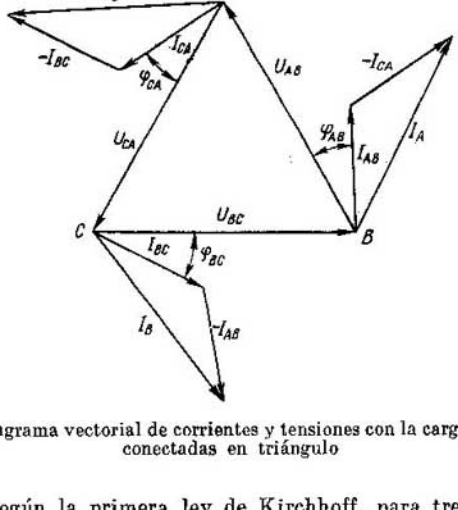


Fig. 191. Diagrama vectorial de corrientes y tensiones con la carga equilibrada conectadas en triángulo

corrientes según la primera ley de Kirchhoff, para tres puntos de empalme A', B' y C' del consumidor:

$$\overline{I}_A + \overline{I}_{CA} = \overline{I}_{AB};$$
$$\overline{I}_B + \overline{I}_{AB} = \overline{I}_{BC};$$
$$\overline{I}_C + \overline{I}_{BC} = \overline{I}_{CA};$$

de donde

$$\overline{I}_A = \overline{I}_{AB} - \overline{I}_{CA};$$
$$\overline{I}_B = \overline{I}_{BC} - \overline{I}_{AB};$$
$$\overline{I}_C = \overline{I}_{CA} - \overline{I}_{BC}.$$

De aquí se ve, que las corrientes de la línea son iguales a la diferencia geométrica de las corrientes de fase. Si la carga es equilibrada, las corrientes de fase son iguales en magnitud y están desfasadas 120° una respecto a la otra. Ejecutando la sustracción de los vectores de las corrientes de fase de acuerdo con las ecuaciones obtenidas, hallamos las corrientes de la línea (fig. 189). La dependencia entre las corrientes de fase y de la línea, en el caso de conexión en

triángulo, está expuesta en la fig. 190.

$$I_l = 2I_f \cos 30°.$$

Puesto que

$$\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

entonces

$$I_l = 2I_f \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_f.$$

Por consiguiente, en el caso de carga equilibrada y conectada en triángulo, la corriente de la línea es $\sqrt{3}$ veces mayor que la de fase.

En la fig. 191 se da el diagrama vectorial de las corrientes y tensiones para el caso de una carga activa, inductiva y equilibrada, conectada en triángulo. El trazado del diagrama se realiza del modo siguiente: trazamos a escala un triángulo equilátero de tensiones compuestas de la red U_{AB}, U_{BC} y U_{AC} que son iguales a las tensiones de fase del consumidor. En dirección del retraso trazamos a escala, formando los ángulos φ_{AB}, φ_{BC}, φ_{CA} con respecto a las tensiones compuestas U_{AB}, U_{BC} y U_{CA}, vectores de las corrientes de fase I_{AB}, I_{BC} e I_{CA}. Después, como fue indicado anteriormente, determinamos las corrientes de la línea I_A, I_B e I_C.

Ejemplo 2. La tensión compuesta, suministrada a un motor eléctrico trifásico es igual a 220 V. El devanado del motor tiene la resistencia total Z igual

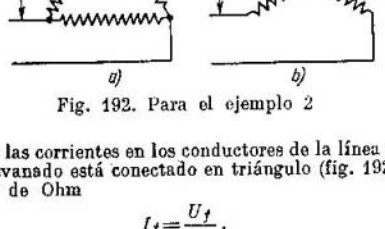


Fig. 192. Para el ejemplo 2

a 10Ω. Determinar las corrientes en los conductores de la línea y en el devanado del motor, si el devanado está conectado en triángulo (fig. 192, *a*).

Según la ley de Ohm

$$I_f = \frac{U_f}{z}.$$

Puesto que en caso de conexión en triángulo $U_{comp} = U_f$, entonces

$$I_f = \frac{220}{10} = 22 \text{ A}.$$

El aislamiento de la fase del motor está calculado para una tensión de 220 V, y la sección del devanado de fase, al calentamiento de una corriente de 22 A.

En caso de conexión en triángulo $I_l = I_f\sqrt{3}$, es decir,

$$I_l = 22 \cdot \sqrt{3} = 22 \cdot 1{,}73 = 38 \text{ A.}$$

El mismo motor se puede conectar también a una tensión compuesta de 380 V, uniendo sus devanados en estrella (fig. 192, *b*).

Al conectar en estrella la tensión de fase es menor que la compuesta 1,73 veces, ya que $U_{comp} = U\sqrt{3}$.

Por consiguiente, a la fase del motor corresponde:

$$U_f = \frac{U_{comp}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1{,}73} = 220 \text{ V,}$$

es decir, la tensión del devanado de fase permanece igual a 220 V.

La corriente en el devanado de fase permanece igual:

$$I_f = \frac{220}{10} = 22 \text{ A.}$$

En la mayoría de los casos, en los motores y otros consumidores de corriente trifásica se sacan al exterior los seis terminales de los tres devanados, los cuales se pueden conectar a voluntad, tanto en

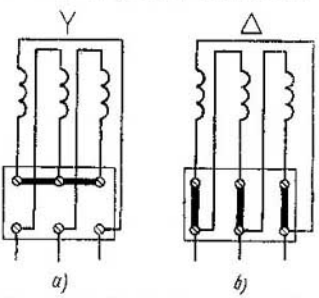


Fig. 193. Conexión de los terminales de devanados a la placa de bornes de una máquina trifásica

estrella, como en triángulo. Generalmente a una máquina trifásica va sujeta una plancha de material aislante (placa de bornes) en la cual se montan los seis terminales.

En la fig. 193 está representado el esquema de conexión de los contactos en la placa de bornes a los terminales de los devanados de una máquina trifásica. Los puentes de cobre permiten cambiar fácilmente el esquema de conexión de los devanados. Si tenemos un motor en cuya ficha técnica está indicado 127/220 V, esto quiere decir, que este motor se puede aplicar para dos tensiones: 127 y 220 V.

Si la tensión compuesta es igual a 127 V, hace falta conectar los devanados del motor en triángulo (fig. 193, *b*). Entonces el devanado de fase del motor recibe una tensión de 127 V. Si la tensión es de 220 V, es necesario conectar los devanados del motor en estrella (fig. 193, *a*), entonces el devanado de fase también recibirá 127 V.

§ 106. Potencia de la corriente alterna trifásica

Es sabido que la potencia activa de la corriente alterna monofásica se calcula por la fórmula:

$$P = I_f U_f \cos\varphi \text{ W},$$

donde I_f y U_f = valores de la corriente y tensión de fase,
y φ = ángulo de desfasamiento entre éstas.

Si en un sistema trifásico la carga está equilibrada, las potencias por fase son iguales y por eso la potencia de las tres fases es:

$$P = 3 I_f U_f \cos\varphi \text{ W}.$$

Tomemos la conexión en estrella. Ha sido determinado para ésta que

$$I_l = I_f; \qquad U_{comp} = U_f \sqrt{3}.$$

Sustituyendo en la fórmula de potencia de las tres fases, los valores de la corriente de la línea y de la tensión compuesta, obtenemos:

$$P = 3 I_l \frac{U_{comp}}{\sqrt{3}} \cos\varphi.$$

Entonces la fórmula de la potencia activa de la corriente trifásica en caso de conexión en estrella tendrá la forma:

$$P = \sqrt{3} I_l U_{comp} \cos\varphi \text{ W}.$$

La potencia total (aparente) será:

$$S = \sqrt{3} I_l U_{comp} \text{ VA}.$$

Para la conexión en triángulo es sabido que:

$$U_{comp} = U_f;$$
$$I_l = I_f \sqrt{3}.$$

Introduciendo en la fórmula de potencia de las tres fases los valores de la corriente de la línea y de la tensión compuesta, obtenemos:

$$P = 3 \frac{I_l}{\sqrt{3}} U_{comp} \cos\varphi,$$

y la fórmula de potencia activa de la corriente trifásica en caso de conexión en triángulo tendrá la forma:

$$P = \sqrt{3} I_l U_{comp} \cos\varphi \text{ W}.$$

La potencia total (aparente) será:

$$S = \sqrt{3} I_l U_{comp} \text{ VA}.$$

Como vemos, las fórmulas de potencia resultaron iguales tanto para la conexión en estrella, como en triángulo.

De este modo, las potencias activa y total de un sistema trifásico se pueden calcular por las fórmulas:

$$P=\sqrt{3}IU\cos\varphi \text{ W y } S=\sqrt{3}IU_{\text{comp}} \text{ VA},$$

donde I y U = valores de la corriente de la línea y de la tensión compuesta. No conviene olvidar que estas fórmulas son aplicables sólo para una carga equilibrada.

Ejemplo 3. Un consumidor trifásico con carga simétrica tiene una resistencia activa de 6Ω y una reactancia inductiva de 8Ω en cada fase. La tensión compuesta es de 220 V. Determinar la potencia del consumidor, si éste está conectado en estrella.

$$U_f=\frac{U_{\text{comp}}}{\sqrt{3}}=\frac{220}{3}=127 \text{ V};$$

$$Z=\sqrt{R^2+x_L^2}=\sqrt{6^2+8^2}=\sqrt{100}=10\Omega;$$

$$I_f=\frac{U_f}{z}=\frac{127}{10}=12{,}7 \text{ A};$$

$$\cos\varphi=\frac{R}{Z}=\frac{6}{10}=0{,}6;$$

$$P_f=I_fU_f\cos\varphi=12{,}7\cdot127\cdot0{,}6=967{,}74 \text{ W}.$$

La potencia de las tres fases es:

$$P=967{,}74\cdot3=2903{,}22 \text{ W}\approx2{,}9 \text{ kW}.$$

Se puede también determinar la potencia del modo siguiente.

$$P=\sqrt{3}IU\cos\varphi=\sqrt{3}\cdot12{,}7\cdot220\cdot0{,}6=2903{,}22 \text{ W}\approx2{,}9 \text{ kW}$$

Si la carga está desequilibrada, hay que calcular primeramente la potencia que consume cada fase por separado, y después se puede sumar las potencias de las tres fases.

Ejemplo 4. Los devanados de un consumidor de corriente trifásica conectados en triángulo están unidos a una tensión compuesta de 380 V (fig. 194).

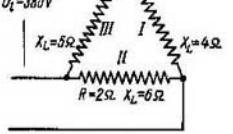


Fig. 194. Para el ejemplo 4

La resistencia activa de la fase I, $R_1 = 8\Omega$; la reactancia inductiva $x_{L_1} = 4\Omega$. La resistencia activa de la fase II, $R_2 = 2\Omega$, la reactancia inductiva $x_{L_2} = 6\Omega$. La resistencia activa de la fase III, $R_3 = 3\Omega$; la reactacia inductiva

$x_{L_3} = 5\Omega$. Determinar la potencia común de las tres fases.

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + x_{L_1}^2} = \sqrt{8^2 + 4^2} = \sqrt{80} = 8{,}9\Omega;$$

$$I_{f_1} = \frac{U_f}{Z_1} = \frac{380}{8{,}9} = 42{,}6 \text{ A};$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{8}{8{,}9} = 0{,}9;$$

$$P_1 = I_{f_1} U \cos\varphi_1 = 42{,}6 \cdot 380 \cdot 0{,}9 = 14{,}569 \text{ W};$$

$$z_2 = \sqrt{2^2 + 6^2} = \sqrt{40} = 6{,}3\Omega;$$

$$I_{f_2} = \frac{380}{6{,}3} = 60{,}3 \text{ A};$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{2}{6{,}3} = 0{,}32;$$

$$P_2 = 60{,}3 \cdot 380 \cdot 0{,}32 = 7.332 \text{ W}.$$

$$z_3 = \sqrt{3^2 + 5^2} = \sqrt{34} = 5{,}8\Omega;$$

$$I_{f_3} = \frac{380}{5{,}8} = 65{,}5 \text{ A}; \quad \cos\varphi_3 = \frac{3}{5{,}8} = 0{,}51;$$

$$P_3 = 65{,}5 \cdot 380 \cdot 0{,}51 = 12.694 \text{ W}.$$

La potencia de las tres fases será:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 14.569 + 7.332 + 12.694 = 34.595 \text{ W} \approx 34{,}6 \text{ kW}.$$

§ 107. Creación de un campo magnético giratorio mediante la corriente trifásica

La particularidad más notable de la corriente trifásica (así como de otras corrientes polifásicas) consiste en la propiedad de crear un campo magnético giratorio.

Sobre un anillo de acero se arrollan tres bobinas desfasadas 120° una respecto a otra y se pasa por éstas una corriente alterna trifásica (fig. 195). Consideremos positiva la dirección de la corriente que pasa desde el comienzo hacia el extremo final de las bobinas, y negativa, la que pasa desde el extremo final hacia el comienzo de las bobinas.

En la fig. 196 se dan las curvas de variación de la corriente alterna trifásica. Analicemos la posición *a*. Las curvas indican que en este momento la corriente de la primera fase i_1 es nula. La corriente de la tercera fase i_3 tiene valor positivo, y la de la segunda fase i_2, valor negativo.

En la fig. 195 se muestran para la posición *a* las direcciones de las corrientes en las bobinas de cada fase. La dirección del campo magnético, creado por cada bobina, se determina según la «regla del sacacorchos». La dirección del campo magnético resultante se indica con el vector Φ.

Examinando diferentes posiciones desde *a* hasta *e*, señaladas respectivamente en las figs. 195 y 196, hallando las direcciones de las corrientes de cada fase y trazando el flujo magnético resultante

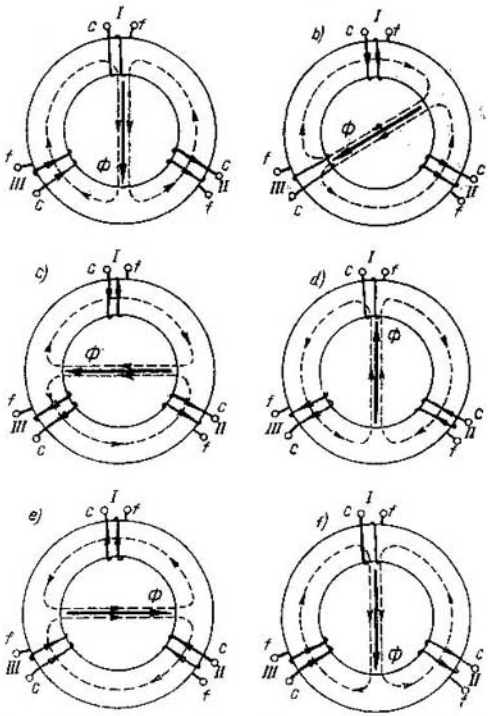


Fig. 195. Obtención de un campo magnético giratorio mediante la corriente trifásica

vemos que el vector Φ no cambia en magnitud, pero su posición en el espacio es diferente: gira. De este modo, en el interior del anillo se creará un campo magnético giratorio.

La dirección de rotación del campo magnético depende del orden de sucesión de las fases (*I*, *II*, *III*). Variando la sucesión de las fases, se puede cambiar la dirección de rotación del campo. Para este fin es suficiente cambiar de lugar dos de los conductores de fase que van a los devanados.

El campo magnético giratorio tiene amplia aplicación práctica.

Si en el interior del anillo de acero, con tres devanados puestos sobre éste, alejamos un tambor de acero (rotor) (fig. 197) y por los devanados hacemos circular una corriente alterna trifásica, el campo magnético giratorio que se forma atravesará el rotor e inducirá en él corrientes que, interactuando con el campo magnético giratorio, pondrán en rotación el rotor.

En los motores sincrónicos y asincrónicos de corriente alterna se aprovecha esta propiedad de la corriente alterna trifásica de crear un campo magnético giratorio. La estructura de estos motores será descrita detalladamente más adelante.

Un campo magnético giratorio se crea no sólo por una corriente alterna trifásica, sino también por corrientes polifásicas (de dos,

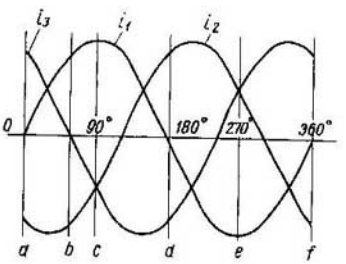


Fig. 196. Curvas de corriente trifásica

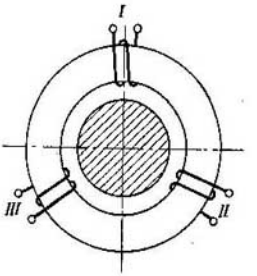


Fig. 197. Método para obtener un campo magnético giratorio

cuatro, seis fases). También se puede obtener un campo giratorio mediante una corriente alterna monofásica, creando artificialmente un desfasaje entre las corrientes, por ejemplo, de dos bobinas, situadas en el espacio a 90°.

Problemas

1. La tensión entre los conductores de la línea de un sistema tetrafilar de una corriente trifásica es igual a 220 V. A la red están conectadas 90 lámparas de incandescencia de 150 W cada una, en cada fase. Determinar para qué tensión deben ser calculadas las lámparas y que corrientes pasan por los conductores de la línea.

2. 30 lámparas de incandescencia distribuidas en tres grupos iguales están conectadas entre los conductores de la línea de una red trifásica. La corriente de una lámpara es de 0,5 A. Determinar las corrientes que pasan en los conductores de la línea.

3. La potencia de un transformador trifásico es de 50 kVA. Determinar la potencia activa que puede entregar el transformador, si el factor de potencia de la carga es: 1; 0,8; 0,6; 0,2.

4. ¿Qué corriente consume de una red un motor trifásico de 5,4 kW de potencia, si la tensión de la red es de 220 V, y el factor de potencia del motor es de 0,8?

5. Tres bobinas inductivas están conectadas en estrella. La resistencia activa de cada bobina es igual a 6Ω, la reactancia inductiva, a 5Ω. Determinar las potencias activa y total que consumen tres bobinas, si la tensión de la red es igual a 220 V.

6. Una bobina con núcleo de acero tiene una resistencia activa de 4Ω y una reactancia inductiva de 6Ω. ¿Qué lectura dará el vatímetro trifásico, si conectamos tres bobinas semejantes en estrella, y después, en triángulo, a una línea de 220 V?

7. La tensión de un alternador de corriente trifásica es igual a 220 V. El vatímetro en el tablero indica 13,2 kW. A la línea están intercaladas en triángulo lámparas de incandescencia. Cada lámpara consume una corriente de 0,25 A. Determinar el número de lámparas conectadas al alternador.

8. Un electromotor de corriente trifásica de 3 CV de potencia está conectado a una red de 220 V de tensión. El factor de potencia del motor es igual a 0,8. Determinar la corriente que el motor consume de la red.

9. Un motor trifásico está conectado a una red de 220 V y consume una corriente de 10 A. El cos φ del motor es 0,85, el rendimiento, 80%. Determinar la potencia en el árbol del motor.

10. La primera bobina tiene resistencia activa de 3Ω y reactancia inductiva de 20Ω. La segunda bobina tiene resistencia activa de 2Ω y reactancia inductiva de 15Ω. La tercera bobina tiene resistencia activa de 6Ω y reactancia inductiva de 30Ω. Las bobinas están conectadas en triángulo e intercaladas a la red de 120 V. Determinar la potencia activa que consumen las tres bobinas.

11. En la ficha técnica de un generador de corriente trifásica está indicado: tensión 127 V, corriente 40 A. ¿Cuántas lámparas de incandescencia se pueden conectar a la máquina, si las lámparas están conectadas en triángulo y cada una consume una corriente de 0,25 A?

Preguntas de control

1. ¿Qué es la corriente alterna trifásica?
2. ¿Cómo se obtiene la corriente trifásica?
3. ¿Qué es un sistema hexafilar, cuatrifilar y trifilar de corriente trifásica?
4. ¿Qué tensiones se llaman de fase y compuestas?
5. ¿Cuál es la relación entre las corrientes y tensiones de fase y compuestas en caso de conexión en triángulo y en estrella?
6. ¿Cómo puede la corriente trifásica crear un campo magnético giratorio?

IX

TRANSFORMADORES

§ 108. Nociones generales sobre los transformadores

En 1876 P. Yablochkov propuso emplear el transformador para alimentar bujías. Más tarde, otro inventor ruso, I. Usaguin, constructor de transformadores, propuso emplear los mismos no sólo para alimentar las bujías de Yablochkov, sino también otros receptores.

Más arriba se indicó que el transformador es un aparato eléctrico basado en el fenómeno de inducción mutua y destinado para transformar la tensión de una corriente alterna, pero conservando la misma frecuencia. El transformador más simple consta de un núcleo de acero y de dos devanados aislados, tanto del núcleo, como uno del otro (fig. 198).

El devanado del transformador que se conecta a la fuente de tensión de denomina d e v a n a d o p r i m a r i o, y el devanado al cual se conectan los consumidores (lámparas de incandescencia, motores eléctricos, aparatos de calentamiento, etc.) o líneas de transmisión que conducen a los mismos, se denomina d e v a n a d o s e c u n d a r i o.

Al pasar por el devanado primario, la corriente alterna crea un flujo magnético alterno que se enlaza con las espiras del devanado secundario e induce en éstas una f.e.m.

Puesto que el flujo magnético es alterno, la f.e.m. inducida en el devanado secundario del transformador es también alterna y su frecuencia es igual a la de la corriente en el devanado primario.

El flujo magnético alterno que pasa por el núcleo del transformador interseca no sólo el devanado secundario, sino también el devanado primario del transformador. Por eso en el devanado primario se inducirá también una f.e.m.

Las magnitudes de las f.e.m. que se inducen en los devanados de los transformadores dependen de la frecuencia de la corriente alterna, del número de espiras en cada devanado y de la magnitud del flujo magnético en el núcleo, es decir, $E = 4{,}44\ f\omega\Phi_m$. Para una frecuencia determinada y un flujo magnético invariable, la

magnitud de la f. e. m. de cada devanado depende sólo del número de espiras del mismo. Esta relación entre las magnitudes de la f.e.m. y los números de espiras de los devanados del transformador se puede expresar con la fórmula:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

donde E_1 y E_2 = f.e.m. de los devanados primario y secundario; w_1 y w_2 = números de espiras de los devanados primario y secundario.

Los voltímetros V_1 y V_2 conectados a los bornes de los devanados primario y secundario (fig. 198) nos indicarán las tensiones U_1 y U_2 de estos devanados.

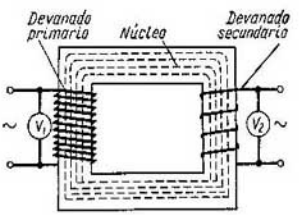


Fig. 198. Esquema de un transformador

Si designamos con U_2 la tensión del devanado secundario durante la marcha en vacío, para los transformadores de construcción corriente y para la marcha en vacío se puede escribir $U_1 \approx E_1$ y $U_2 \approx E_2$.

Pero en la práctica la diferencia entre las f.e.m. y las tensiones es tan pequeña que la relación entre las tensiones y los números de espiras de ambos devanados se puede expresar con la fórmula:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2}.$$

De esta fórmula se deduce que: cuantas veces el número de espiras en el devanado primario es mayor (o menor) que el del devanado secundario, tantas veces la tensión del devanado primario es mayor (o menor) que la del devanado secundario.

La diferencia entre la f.e.m. y la tensión en el devanado primario del transformador se hace particularmente pequeña, cuando el devanado secundario es abierto y la corriente en éste es igual a cero (marcha en vacío) y por el devanado primario pasa solamente una corriente insignificante que se denomina corriente de marcha en vacío. En este caso la tensión en los bornes del devanado secundario es igual a la f.e.m. que se induce en éste.

El número que indica cuántas veces la tensión en el devanado primario es mayor (o menor) que la tensión en el devanado secundario, se denomina relación de transformación del transformador y se designa con la letra k.

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

La tensión nominal de los devanados de tensiones máxima y mínima, indicada en el tablero de fábrica del transformador se refiere al régimen de marcha en vacío.

Las corrientes nominales de los devanados se adoptan iguales a los cocientes de la división de la potencia nominal del transformador por las tensiones nominales correspondientes.

Ejemplo 1. Hay un transformador cuyo devanado primario está conectado a una red de 6.600 V, y en los bornes del devanado secundario la tensión es igual a 230 V. Determinar la relación de transformación.

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{6.600}{230} = 28{,}7$$

En la ficha técnica de todo transformador siempre se dan las tensiones nominales de ambos devanados, referidas al régimen de marcha en vacío. Por lo tanto es fácil determinar la relación de transformación.

La relación de transformación se puede averiguar también de un modo empírico. Para eso hace falta (observando las reglas de la técnica de seguridad contra la alta tensión) conectar los voltímetros a los bornes de los devanados primario y secundario del transformador y abrir el circuito del devanado secundario, asegurando de este modo el trabajo de marcha en vacío del transformador. Después, hay que dividir la lectura del voltímetro del devanado primario por la del devanado secundario.

Ejemplo 2. El devanado primario del transformador está conectado a una red de 10.000 V de tensión; en los bornes del devanado secundario la tensión es igual a 100 V. Determinar la relación de transformación del transformador y el número de espiras del devanado secundario, si el del devanado primario es igual a 21.000.

La relación de transformación

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{10.000}{100} = 100.$$

Para determinar el número de espiras del devanado secundario utilicemos la fórmula

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Colocando las cifras tendremos:

$$\frac{10.000}{100} = \frac{21.000}{w_2},$$

de donde

$$w_2 = \frac{100 \cdot 21.000}{10.000} = 210 \text{ espiras.}$$

Este mismo resultado obtendremos, si recordamos que

$$k = \frac{w_1}{w_2}, \text{ de donde } w_2 = \frac{w_1}{k}.$$

Puesto que

$$k = 100 \text{ y } w_1 = 21.000,$$

entonces

$$W_2 = \frac{21.000}{100} = 210 \text{ espiras.}$$

En los ejemplos que acabamos de analizar, los transformadores han servido para disminuir la tensión. Tales transformadores se denominan transformadores reductores o de baja y sus relaciones de transformación son mayores que la unidad.

Ejemplo 3. Tomemos el mismo transformador que en el ejemplo anterior Si a los bornes del devanado que tiene 21.000 espiras no le proporcionamos 10.000 V, como en el ejemplo anterior, sino, por ejemplo, 9.900 V, puesto que en el devanado secundario hay 210 espiras, es decir, 100 veces menos que en el primario, la tensión secundaria será también 100 veces menor que la primaria. Sustituyendo valores en la fórmula

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

tendremos:

$$\frac{9.900}{U_2} = \frac{21.000}{210}; \qquad U_2 = \frac{9.900 \cdot 210}{21.000} = 99 \text{ V.}$$

Del ejemplo estudiado se puede deducir que la disminución de la tensión en el devanado primario va acompañada por la disminución de la tensión en el devanado secundario del transformador.

Ejemplo 4. Si en el mismo transformador que hemos usado en los dos ejemplos anteriores, conectamos el devanado con 210 espiras, por ejemplo, a una tensión de 100 V, este devanado se denominará ahora primario. En el devanado secundario con 21.000 espiras la tensión será 100 veces mayor, o sea, equivaldrá a 10.000 V.

La relación de transformación del transformador será igual a:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{100}{10.000} = \frac{1}{100}.$$

El transformador estudiado en el último ejemplo sirve para elevar la tensión. Tales transformadores se llaman transformadores elevadores o de alta y su relación de transformación es menor que la unidad.

Hasta ahora partíamos de la suposición de que el flujo magnético del transformador se cierra completamente a través del núcleo. En realidad ocurre algo diferente. La mayor parte de los flujos magnéticos creados por los devanados primario y secundario del transfor-

mador se cierran a través del núcleo, pero otra, la parte menor, se cierra en torno de algunas espiras a través del aire en forma de flujos de dispersión Φ_{s_1} y Φ_{s_2} (fig. 199).

Para mayor claridad, los devanados primario y secundario están dispuestos aquí sobre diferentes columnas. Pero, en la práctica, los devanados se disponen sobre ambas columnas para disminuir los flujos de dispersión y, por consiguiente, Φ_{s_1} y Φ_{s_2}.

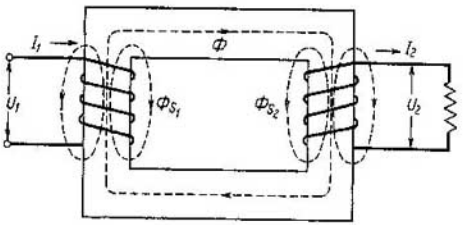


Fig. 199. Flujos magnéticos de un transformador

Los flujos de dispersión inducen en sus devanados las f.e.m. cuyas magnitudes pueden ser determinadas por las fórmulas:

$$E_{s_1} = 2\pi f L_{s_1} I_1,$$
$$E_{s_2} = 2\pi f L_{s_2} I_2,$$

de donde L_{s_1} y L_{s_2} = inductancias de dispersión de los devanados.

Designando

$$x_{s_1} = 2\pi f L_{s_1},$$
$$x_{s_2} = 2\pi f L_{s_2},$$

tendremos

$$E_{s_1} = x_{s_1} I_1,$$
$$E_{s_2} = x_{s_2} I_2,$$

donde x_{s_1} y x_{s_2} = reactancias inductivas de dispersión de los devanados.

§ 109. Trabajo en vacío del transformador

El régimen, cuando el devanado secundario del transformador está abierto y a los bornes del devanado primario se proporciona tensión alterna, se denomina marcha en vacío o trabajo en vacío del transformador.

El flujo magnético excitado por el devanado primario induce en el secundario una f.e.m., cuya magnitud es igual a:

$$E_2 = 44{,}4 f w_2 \Phi_m;$$

el mismo flujo magnético induce en el devanado primario una f.e.m.

$$E_1 = 44{,}4 f w_1 \Phi_m,$$

la cual equilibra sin pérdidas la tensión aplicada U_1 en el transformador.

La pequeña corriente que consume el devanado primario del transformador durante la marcha en vacío se denomina corriente de marcha en vacío. La magnitud de esta corriente constituye generalmente de 3,5 a 10% de la corriente para la carga nominal del transformador.

Tracemos el diagrama vectorial de tensiones de trabajo en vacío de un transformador monofásico sin pérdidas (ideal) (fig. 200). La corriente de magnetización I_p crea un flujo magnético Φ_m que está en fase con la corriente I_p.

El flujo magnético Φ_m induce en el devanado primario la f.e.m. E_1, y en el secundario, la f.e.m. E_2. Recordemos que toda f.e.m. inducida por un flujo magnético que varía en forma sinusoidal, se retrasa 90° del flujo (véase § 86). Por eso trazamos los vectores E_1 y E_2 formando un ángulo de 90° con el flujo Φ_m en sentido contrario a la rotación de los vectores.

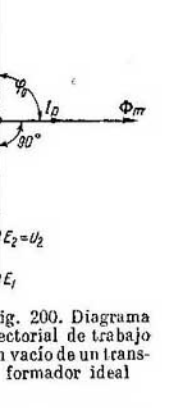


Fig. 200. Diagrama vectorial de trabajo en vacío de un transformador ideal

La f.e.m. E_1 inducida en el devanado primario está equilibrada por la tensión de la red U_1. La f.e.m. E_1 y la tensión U_1 son iguales y contrarias una a otra.

En el diagrama vectorial se ve que la corriente I_p, que consume el transformador durante el trabajo en vacío, se atrasa 90° de la tensión de la red U_1.

En un transformador real es necesario tener en cuenta las pérdidas y la dispersión del flujo magnético. Las pérdidas tendrán lugar en el acero y en el cobre. Las pérdidas en el acero: las de histéresis y de corrientes parásitas que surgen en un núcleo de acero; las pérdidas eléctricas en el cobre del transformador son para el calentamiento de sus devanados por la corriente. El transformador se diferencia de otras máquinas y aparatos por el sistema magnético cerrado y ausencia de piezas giratorias. Por eso sus pérdidas son pequeñas. El rendimiento de los transformadores de altas potencias alcanza el 99% y más.

La corriente de la marcha en vacío I_0 del transformador tiene dos componentes (fig. 201): 1) la activa $I_a = I_0 \cos \varphi_0$ debida a las pérdidas en el acero. Esta componente es muy reducida, ya que son pequeñas las pérdidas en vacío; 2) la reactiva $I_r = I_0$ son φ_0 denominada corriente de magnetización que crea el flujo magnético Φ_m y coincide con éste en fase. Debido a la magnitud reducida de la componente activa $I_0 \cos \varphi_0$, la corriente de magnetización es casi igual

a toda la corriente en vacío I_0. Por eso I_0 es casi completamente reactiva.

La gran diferencia entre las tensiones de los devanados primario y secundario de los transformadores dificulta el trazado de sus diagramas vectoriales. Por lo tanto, al estudiar los transformadores el devanado secundario se reduce al número de espiras del devanado primario. La conversión consiste en suponer que el número de espiras

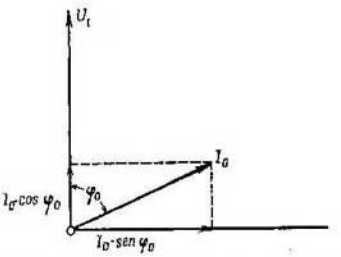


Fig. 201. Diagrama de corriente de marcha en vacío

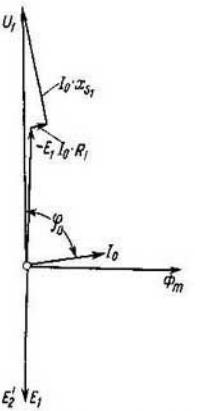


Fig. 202. Diagrama vectorial de marcha en vacío de un transformador real

w_2 del devanado secundario es igual al número de espiras w_1 del primario. En este caso cambian la f.e.m., la corriente y la resistencia del devanado secundario. La reducción de las magnitudes del devanado secundario al número de espiras del primario no debe variar la potencia y los ángulos de desfasamiento en el transformador.

Las magnitudes reducidas del devanado secundario se designan mediante primas, por ejemplo, E_2', I_2', R_2', etc. Para obtener E_2' hay que cambiar E_2 proporcionalmente a la relación de transformación $k = \frac{w_2}{w_1}$. Por consiguiente

$$E_2' = \frac{w_1}{w_2} E_2 = kE_2 = E_1.$$

La corriente secundaria reducida I_2' se determina de la condición de que, después de la reducción, la potencia aparente del devanado secundario ha de mantenerse invariable:

$$E_2' I_2' = E_2 I_2,$$

de donde

$$I_2' = \frac{E_2}{E_2'} I_2 = \frac{1}{k} I_2.$$

Tracemos el diagrama vectorial de tensiones de trabajo en vacío de un transformador real (fig. 202). La tensión de la red aplicada al devanado primario debe equilibrar la f.e.m.—E_1, la caída activa de tensión $I_0 R_1$, que está en fase con la corriente I_0, y la caída inductiva de tensión $I_0 x_{s_1}$ que adelanta la corriente I_0 en 90° en fase. La suma geométrica de los vectores—E_1, $I_0 R_1$ y $I_0 x_{s_1}$ da la tensión de la red U_1.

§ 110. Carga del transformador

Se denomina carga del transformador un régimen en el cual el devanado secundario está conectado a cierta resistencia. En este caso por el devanado secundario pasará la corriente I_2 que creará su flujo magnético Φ_2. De este modo, al cargar el transformador, actuarán en éste fuerzas de magnetización de los dos devanados y en su núcleo se formará un flujo magnético, debido a la acción de los flujos de ambos devanados.

Según la ley de Lenz, el flujo magnético del devanado secundario Φ_2 tiende a disminuir el del devanado primario. Pero el flujo magnético resultante ha de quedar invariable (mejor dicho, casi constante), ya que la f.e.m. E_1 inducida por éste, siendo invariable la tensión de la red U_1, debe permanecer casi invariable y casi igual a la tensión U_1. Tracemos el diagrama vectorial para el régimen de carga de un transformador ideal en el caso en que a los bornes de su devanado secundario está conectada una resistencia activa.

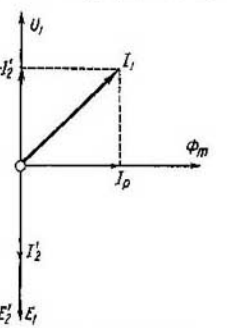


Fig. 203. Diagrama vectorial de un transformador ideal con carga activa

El flujo magnético del transformador Φ_m y la corriente de magnetización I_r coinciden en fase (fig. 203). Las f.e.m. E_1 y E_2 se retrasan 90° con respecto al flujo magnético Φ_m. Puesto que la carga es activa y el transformador no tiene pérdidas, la corriente I_2' está en fase con la f.e.m. E_2'. Cuando el transformador está cargado, la suma geométrica de las fuerzas de magnetización de los devanados primarios y secundarios será casi igual a la fuerza de magnetización del devanado primario durante el trabajo en vacío.

$$\overline{I}_1 w_1 + \overline{I}_2 w_2 = \overline{I}_0 w_1.$$

Según la ley de Lenz la fuerza de magnetización del devanado secundario $I_2 w_2$ tratará de disminuir el flujo del devanado primario. Por eso por las espiras del devanado primario debe pasar la corriente

I_1, que excite el flujo magnético Φ_m y compense también la acción desmagnetizadora del devanado secundario. En otras palabras, la fuerza de magnetización del devanado primario $I_1 w_1$ debe constar de la $I_0 w_1$, que crea el flujo Φ_m y la $I_2 w_2$, que compensa la fuerza de magnetización del devanado secundario:

$$I_1 w_1 = I_0 w_1 - I_2 w_2,$$

o bien,

$$\overline{I}_1 = -\overline{I}_2 \frac{w_2}{w_1} + \overline{I}_0 = -\overline{I}'_2 + \overline{I}_0,$$

es decir, en este caso la corriente primaria es igual a la suma geométrica de la corriente de trabajo en vacío $\overline{I}_0$ y del valor negativo de la corriente reducida $\overline{I}'_2$ del devanado secundario.

Tracemos el diagrama vectorial del transformador real con carga activa (fig. 204). La tensión en los bornes del devanado secundario U'_2 con carga, es menor que la f.e.m. E'_2 en una magnitud igual a las caídas de tensiones en el mismo devanado. Por lo tanto, obtendremos la tensión U'_2 (vector OK), si de la f.e.m. E'_2 (OP) restamos geométricamente la caída inductiva de tensión $I'_2 x'_{s2}$ y la caída activa de tensión $I'_2 R'_2$. Puesto que la carga es activa, la corriente $\overline{I}'_2$ coincide en fase con la tensión U'_2. La corriente del circuito primario $\overline{I}_1$ se obtuvo como total de la suma geométrica de las corrientes de trabajo en vacío $\overline{I}_0$ y de la reducida de carga $\overline{I}'_2$ tomada con signo inverso,— I'_2. La tensión que se proporciona al devanado primario U_1 del transformador ha de equilibrar la f.e.m. E_1 y la caída de tensión en este devanado. Por lo tanto, para obtener la tensión U_1 debemos sumar geométricamente — E'_1, que equilibra la f.e.m. E_1 (OD); la caída activa de tensión en el devanado primario $I_1 R_1$ (DM), que coincide en fase con la corriente; y la caída inductiva de tensión en este devanado $I_1 x_{s1}$ (MF). El vector OF determina la magnitud y la fase de la tensión aplicada U_1.

El diagrama vectorial del transformador con carga activa e inductiva se muestra en la fig. 205, y con carga activa y capacitiva, en la fig. 206. Del trazado de los diagramas vectoriales del transformador real se ve que el aumento de la corriente de carga I_2 lleva: 1) al incremento de la caída de tensión en el devanado secundario; 2) a la disminución de la tensión U_2 en los bornes del devanado secundario (si hay carga capacitiva, la tensión U_2 puede aumentar); 3) al incremento de la corriente I_1 en el circuito primario; 4) al incremento de la caída de tensión en el devanado primario; 5) a que si la magnitud de la tensión aplicada U_1 es constante disminuya E_1; 6) a que la f.e.m. E_1 pueda disminuir sólo a cuenta de la disminución del flujo magnético Φ_m del transformador.

De este modo, el aumento de la corriente de carga I_2 lleva no sólo al incremento de la corriente I_1, que consume el transformador de la red, sino también a la disminución del flujo magnético en el

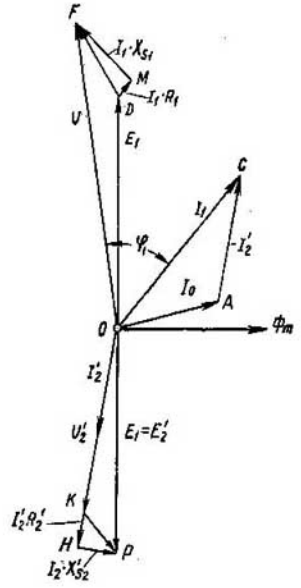


Fig. 204. Diagrama vectorial de un transformador real con carga activa

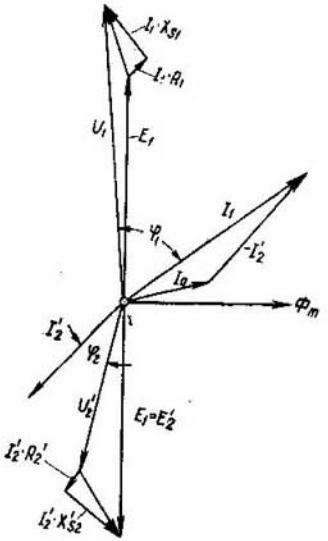


Fig. 205. Diagrama vectorial de un transformador real con cargas activa e inductiva

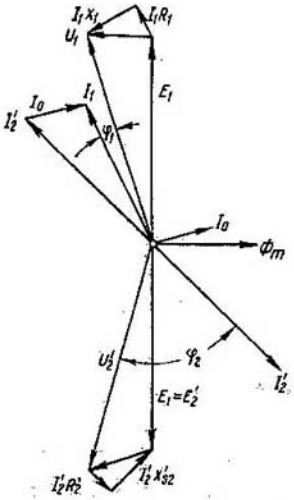


Fig. 206. Diagrama vectorial de un transformador con cargas activa y capacitiva

núcleo. Sin embargo, en los límites desde el trabajo en vacío hasta la carga completa, las variaciones del flujo magnético Φ_m no son grandes y, a menudo, se considera invariable en los cálculos aproximados

§ 111. Ensayos sobre el trabajo en vacío y el cortocircuito del transformador

Si conectamos el devanado primario del transformador a la tensión de la red y cortocircuitamos los bornes de su devanado secundario, causaremos el peligroso fenómeno de cortocircuito del transformador. Las corrientes de cortocircuito desprenden gran cantidad de calor en los devanados, lo que puede llevar al deterioro de la cubierta aisladora de sus hilos, y a la descomposición e inflamación del aceite que se encuentra en la caja del transformador. Las fuerzas mecánicas, que surgen en los devanados del transformador en caso de cortocircuito, pueden llevar a veces a la destrucción de los devanados.

Pero, si cortocircuitamos los bornes del devanado secundario del transformador y conectamos el devanado primario a la tensión menor, de modo que la corriente de cortocircuito I_{2c} sea igual a la nominal I_{2n}, no habrá peligro alguno para el transformador. Este experimento se denomina **experimento de cortocircuito**. La tensión que se suministra al devanado primario del transformador durante el experimento de cortocircuito constituye sólo unas centésimas de la tensión nominal de dicho devanado, y se denomina **tensión de cortocircuito**, U_c.

Los transformadores de potencia, que se fabrican en la URSS, tienen una tensión de cortocircuito de 5 al 10% (en algunos casos, de 17%) de la tensión nominal primaria.

Durante las pruebas de los transformadores siempre se toman las características de cortocircuito y de trabajo en vacío.

Para tomar la característica de trabajo en vacío del transformador, se abre su devanado secundario, y al primario se conecta un amperímetro, un voltímetro y un vatímetro. Se aumenta gradualmente la tensión que se suministra al devanado primario y se registran las indicaciones de los aparatos. La característica modelo del trabajo en vacío de un transformador se muestra en la fig. 207.

Con tensiones pequeñas, que corresponden a la parte inicial de la característica de trabajo en vacío, el sistema magnético del transformador no está saturado y existe la proporcionalidad entre la tensión U y la corriente I_0. Al aumentar la tensión, el núcleo del transformador va saturándose y la corriente I_0 comienza a crecer más rápidamente que la tensión.

Según los datos del experimento de trabajo en vacío se calculan las resistencias, el factor de potencia, las componentes activa y reactiva de la corriente de trabajo en vacío del transformador. La potencia que se suministra al transformador durante el trabajo en vacío

se gasta en cubrir las pérdidas de trabajo en vacío. Puesto que la corriente de trabajo en vacío I_0 es pequeña, se pueden despreciar las pérdidas de potencia para el calentamiento del devanado primario (iguales a $I_0^2 R_1$) y considerar que la potencia que consume el transformador durante el trabajo en vacío cubre las pérdidas en el acero del núcleo.

Para tomar la característica de cortocircuito del transformador se conectan un amperímetro, un voltímetro y un vatímetro en el circuito de su devanado primario, y el devanado secundario se pone

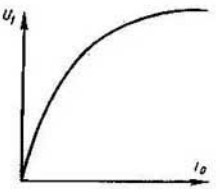


Fig. 207. Característica de la marcha en vacío de un transformador

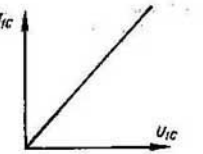


Fig. 208. Característica de cortocircuito de un transformador

en cortocircuito a través de un amperímetro. Aumentando la tensión que se suministra al devanado primario, se anotan las indicaciones de los aparatos. Según los datos del experimento de cortocircuito, se calculan las resistencias y la tensión de cortocircuito.

En el experimento de cortocircuito, entre la corriente y la tensión existe una función lineal. Esto se explica por que el flujo magnético en el núcleo es reducido, ya que la tensión de cortocircuito es muchas veces menor que la nominal. Por eso se puede no tomar en cuenta las pérdidas en el acero en el ensayo de cortocircuito y considerar que la potencia cubre las pérdidas en el cobre de los devanados del transformador ($I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$). La característica modelo del cortocircuito se muestra en la fig. 208.

Valiéndose de los datos obtenidos en los experimentos de trabajo en vacío y de cortocircuito, es posible determinar el rendimiento del transformador según la fórmula:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta P_c \cos \varphi_2}{\beta P_c \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{cob}},$$

donde

P_0 = pérdidas en el acero que prácticamente son iguales a las pérdidas medidas durante el experimento de trabajo en vacío, siendo nominal la tensión;

$\beta^2 P_{coe}$ = pérdidas en el cobre, proporcionales al cuadrado de multiplicidad de la corriente de carga;

P_{cus} = pérdidas en el cobre, cuando la tensión es nominal, prácticamente iguales a P_c medidas durante el experimento de cortocircuito, siendo $I_c = I_n$;

$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}}$ = multiplicidad de la corriente de carga.

§ 112. Papel del transformador en la transmisión de la energía eléctrica a distancia

Ejemplo 5. En una central eléctrica está instalado un generador de corriente continua de 200 kW de potencia y 230 V de tensión. Se necesita calcular la sección necesaria de los cables de cobre de las líneas transmisoras que van al consumidor a una distancia de 10 km de la central eléctrica.

La corriente que pasa, tanto por el devanado del generador, como por la línea transmisora, será igual a:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200.000}{230} = 870 \text{ A}.$$

En la línea transmisora hay pérdidas térmicas. Es imposible evitarlas. Se puede sólo reducir su magnitud.

Supongamos que las pérdidas tolerables en la línea constituyen el 10% de la potencia transmitida, o sea, 20 kW. La resistencia de la línea se determina por la fórmula $P = 2 \cdot I^2 R$, de donde la resistencia de un cable será

$$R = \frac{P}{2 \cdot I^2} = \frac{20.000}{2 \cdot 870^2} = 0{,}013 \Omega.$$

De la fórmula

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

se puede determinar la sección de los cables de la línea:

$$S = \frac{\rho \cdot l}{R} = \frac{0{,}0175 \cdot 10.000}{0{,}013} = 13.461 \text{ mm}^2.$$

Esta sección corresponde a la de un cable de 13,4 cm de diámetro. Un metro de semejante cable pesaría 119,8 kg. El cable de cobre para toda la línea pesaría 2.396 toneladas.

El resultado obtenido muestra, que no se puede utilizar la corriente continua de baja tensión para transmitir inclusive cantidades relativamente pequeñas de energía eléctrica a distancias grandes.

Ahora tratemos de sustituir en nuestra central eléctrica el generador de corriente continua por otro de corriente alterna. Supongamos que este generador tiene la tensión de 230 V y la misma potencia de 200 kW. Consideremos que la carga de la red es activa.

Instalemos en la central eléctrica un transformador elevador con coeficiente de transformación 1 : 43,4 (fig. 209).

La tensión de la línea transmisora será igual a $230 \cdot 43{,}4 = 10\,000$ V. Debido a las pérdidas insignificantes en el propio transformador, adoptemos la potencia que se suministra a su devanado primario igual a la que suministra el devanado secundario.

Si la potencia del devanado primario es igual a 200 kW, la misma será la del devanado secundario. De aquí, la corriente secundaria del transformador será:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200.000}{10.000} = 20 \text{ A}.$$

La fórmula

$$P = 2 \cdot I^2 \cdot R$$

muestra que, puesto que la corriente en los cables de la línea transmisora se ha reducido en 43,4 veces, tolerando el mismo gasto de potencia en la línea, la resistencia de los cables puede ser mayor en $43{,}4^2$ veces, y la sección menor en $43{,}4^2$ veces, o sea

$$S = \frac{13.461}{43{,}4^2} = 7{,}1 \text{ mm}^2.$$

Se selecciona la sección de 10 mm² standard.

El ejemplo estudiado muestra claramente el papel del transformador en la transmisión de la energía eléctrica a gran distancia. Aumentando la tensión en la línea por medio de un transformador elevador, reducimos la corriente en los cables de la línea y podemos

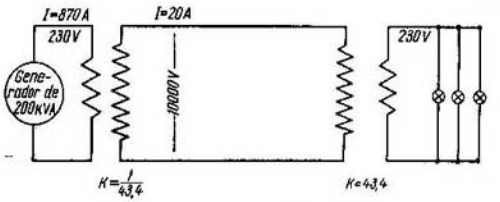


Fig. 209. Empleo del transformador para transmitir energía eléctrica a distancia

elegir una sección menor de los cables. Cuanto más larga sea la línea transmisora y cuanto mayor sea la potencia eléctrica que se transmite, tanto más alta debe ser la tensión entre los cables de la línea.

Pero, generalmente, no se puede conectar los consumidores a una línea de alta tensión. Por eso en el extremo de la línea se instala un segundo transformador, el de baja, que transforma la energía eléctrica de la corriente de alta tensión en la de baja tensión accesible para ser utilizada por los consumidores. En nuestro ejemplo (fig. 209) está instalado un transformador reductor con coeficiente de transformación $k = 43{,}4$. De este modo, los consumidores recibirán una corriente de tensión algo menor de 230 V, si tomamos en consideración la caída de tensión en la línea y en los transformadores (para simplificar el cálculo despreciamos la caída de tensión en la línea transmisora eléctrica).

Actualmente existen líneas de transmisión con tensión de 220, 287, 400 y 500 kV.

Al aumentar la tensión en la línea aumenta: el número de aisladores de los cuales se suspenden los cables, las dimensiones de los postes, el costo de los transformadores elevadores y reductores y de subestaciones. La transmisión de una potencia de hasta 1 millón de kW a una distancia de 1—2 mil km exigirá una tensión de 500 a 600 kV.

Actualmente en la URSS se explotan inmensos recursos energéticos. Se construyen nuevas centrales hidráulicas en los ríos de Siberia, Asia Central, Azerbaidzhán y Armenia. Se erigen helioinstalaciones (motores solares en Asia Central); se construyen grandes centrales eléctricas térmicas cerca de los yacimientos de combustibles y plantas de turbina de gas, que utilizan el gas obtenido mediante la elaboración subterránea del carbón y del esquisto. Se construyen centrales eléctricas que funcionan por medio de la energía atómica. Todo eso trae consigo el desarrollo de potentes sistemas energéticos, alejados, a menudo, a distancias muy grandes uno de otro.

La utilización racional de la energía de sistemas aislados es posible, si se enlazan en una red única de alta tensión.

Los cálculos económicos han demostrado que a distancias muy grandes es más ventajoso transmitir la energía eléctrica con corriente continua de muy alta tensión (hasta 1 millón de V). El costo de la línea y de su utillaje es, en este caso, dos veces menor que el de una línea de corriente alterna. La transmisión de corriente continua a distancias muy lejanas se realiza según el siguiente esquema. Los generadores de la central eléctrica producen una corriente alterna trifásica de unos 15 kV de tensión. El transformador eleva la tensión recibida del generador hasta varios centenares de kilovoltios. En la misma central, por medio de rectificadores especiales, la corriente alterna se convierte en continua de alta tensión, la cual pasa a un extremo de la línea transmisora. En el otro extremo de la línea está instalado un aparato, i n v e r t o r, cuya función consiste en transformar la corriente continua de nuevo en alterna, cuya tensión es disminuida después por un transformador de baja hasta la necesaria para los consumidores.

§ 113. Construcción y tipos de transformadores

El núcleo (conductor magnético) del transformador forma un circuito cerrado para el flujo magnético y se fabrica de acero electrotécnico (de transformador) en chapas, marca Э4-2 y de 0,5 y 0,35 mm de espesor. El acero electrotécnico contiene de 4,0 a 4,8% de silicio. La presencia del silicio mejora las propiedades magnéticas del acero y aumenta su resistencia específica a las corrientes parásitas. Para aislar las chapas de acero una de otra, se cubren de una capa de barniz, después de lo cual se sujetan con pernos que pasan por casquillos aislantes. Esta construcción se emplea para reducir las corrientes parásitas que se inducen en el acero por el flujo magnético alterno. Las partes del conductor magnético, sobre las cuales se pone el devanado, se denominan columnas. Las columnas se unen con las culatas superior e inferior.

Según la construcción del conductor magnético se distinguen dos tipos de transformadores: los d e c o l u m n a s y l o s a c o r a z a d o s (fig. 210). En los transformadores de columnas los

devanados envuelven las columnas del conductor magnético; en los de tipo acorazado el conductor magnético, al contrario, envuelve, como una «coraza», los devanados. En caso de deterioros en el devanado del transformador acorazado es incómodo revisarlo y difícil hacer la reparación. Por eso, han adquirido mayor difusión los transformadores de columnas.

El devanado de los transformadores se hace de alambre de cobre aislado, de sección circular o rectangular. Sobre la columna del conductor magnético se pone previamente un cilindro aislador (generalmente, de cartón impregnado de barniz de baquelita), sobre

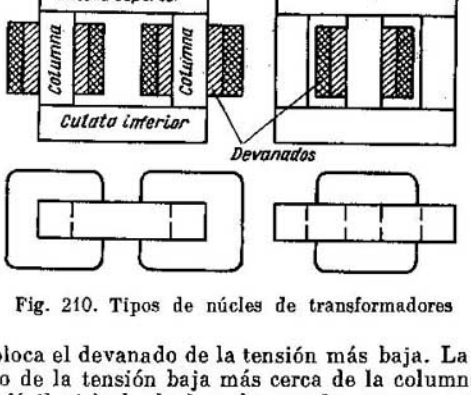


Fig. 210. Tipos de núcles de transformadores

el cual se coloca el devanado de la tensión más baja. La disposición del devanado de la tensión baja más cerca de la columna se explica por ser más fácil aislarlo de la columna de acero que el devanado de la tensión más alta.

Sobre el devanado de baja tensión se pone otro cilindro aislador cubierto con el devanado de alta tensión. La disposición exterior de este devanado es cómoda también, ya que en caso de desperfectos (que ocurren más a menudo en el devanado de alta tensión) éste es accesible para la revisión y reparación.

Los terminales de los devanados de alta y baja tensiones salen a través de aisladores de paso, fijados en la tapa de acero del transformador.

El núcleo con los devanados se coloca habitualmente en una caja rectangular u ovalada, fabricada de chapas de acero.

La caja se llena de aceite especial de transformador que dispone de alta rigidez dieléctrica.

Las espiras del devanado, bañadas en aceite, están bien aisladas una de otra. Además, el aceite de transformador, que dispone de gran conductividad térmica, toma el calor de los devanados y lo entrega a la caja. Para aumentar la superficie de refrigeración la caja se hace

con nervaduras. Para este mismo fin, a la caja se le sueldan tubos que se comunican con ésta en las partes superior e inferior. Para los transformadores de gran potencia los tubos se sueldan en bloques separados que se denominan *radiadores*; éstos se fijan a la caja.

Durante el trabajo del transformador, el aceite que extrae el calor de los devanados, se calienta y empieza a dilatarse. Al enfriarse, el aceite se contrae y en el espacio libre del aceite puede penetrar aire húmedo. Para evitar esto, entre la tapa y la caja se coloca una junta de goma que no deja penetrar el aire en la caja.

Si la cantidad de aceite en la caja es grande, su dilatación durante el calentamiento puede ser tan considerable que se derrame por la tapa. Para que el aceite pueda dilatarse, en la tapa del transformador se instala un depósito complementario que se denomina conservador de aceite. Este depósito se une mediante un tubo con la caja. Cuando el aceite se calienta, pasa al conservador de aceite y, durante el enfriamiento, se contrae su volumen y regresa a la caja. En el conservador de aceite se instala un tubo de vidrio, medidor de aceite, para observar el nivel del mismo. Los transformadores de potencias bajas (de 5 a 10 kVA) se construyen a veces con refrigeración natural, por aire.

Para refrigerar mejor los transformadores de aceite se montan ventiladores, movidos por motores eléctricos. Para este mismo fin algunos transformadores tienen una bomba de aceite, que hace circular el aceite calentado de la parte superior de la caja, a través de un serpentín, donde es enfriado por una corriente de agua, y lo suministra ya enfriado a la parte inferior de la caja del transformador. En la fig. 211 se muestra un transformador con refrigeración natural por aceite, y en la fig. 212 una parte del transformador de aceite con refrigeración artificial por aire (ventilación).

Las observaciones sobre la temperatura del aceite en la caja se efectúan generalmente por medio de un termómetro instalado en la tapa del transformador.

Hasta ahora hemos estudiado los transformadores en los cuales a una fase le corresponden dos devanados, de alta y de baja tensión. Tales transformadores se llaman de dos devanados. Hay transformadores en los cuales a una fase le corresponden un devanado primario y dos secundarios. El devanado primario es de alta tensión (A.T.). De acuerdo con la magnitud de la tensión en los bornes, los devanados secundarios se denominan: uno, de media tensión (M. T.) y otro, de vaja tensión (B. T.). Semejantes transformadores se denominan de tres devanados. Las tensiones de un transformador de tres devanados se indican con un quebrado triple, por ejemplo, 220/115/10,5 kV ó 110/35,8/11 kV.

En la fig. 213 se muestra un transformador monofásico reductor de potencial de tres devanados ОДТГ-90.000/400. El devanado de alta tensión de este transformador se hace para 400 kV, el de media, para 110 kV y el de baja, para 11 kV. La refrigeración del transforma-

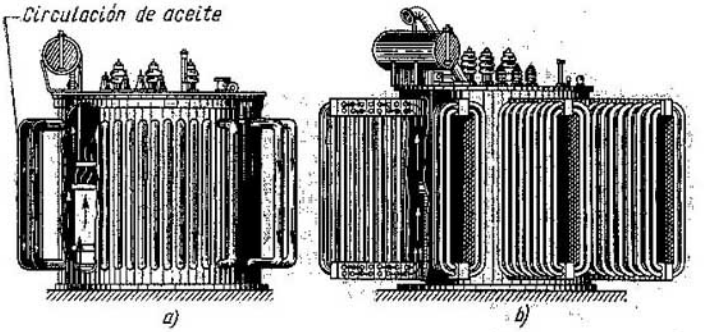


Fig. 211. Transformadores de refrigeración natural por aceite:
a — transformador con caja tubular (TM-320/6), b — transformador con caja de radiadores (TM-5.600/35)

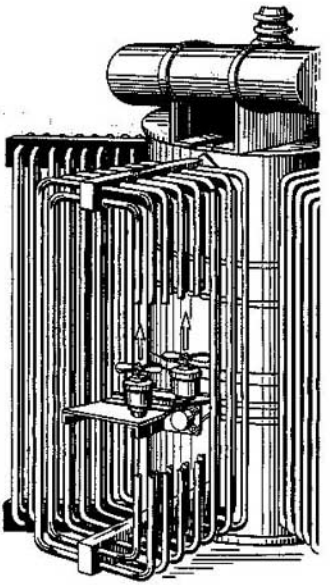


Fig. 212. Transformador de aceite con ventilación

dor se realiza con radiadores tubulares y ventilación complementaria de los radiadores mediante ventiladores especiales. Las características principales del transformador ОДТГ-90.000/400 son: potencia, 90.000 kVA, tensiones nominales, 400/110/11 kV, peso, 335 toneladas, longitud, 11,27 m, anchura, 7,61 m, altura, 12 m.

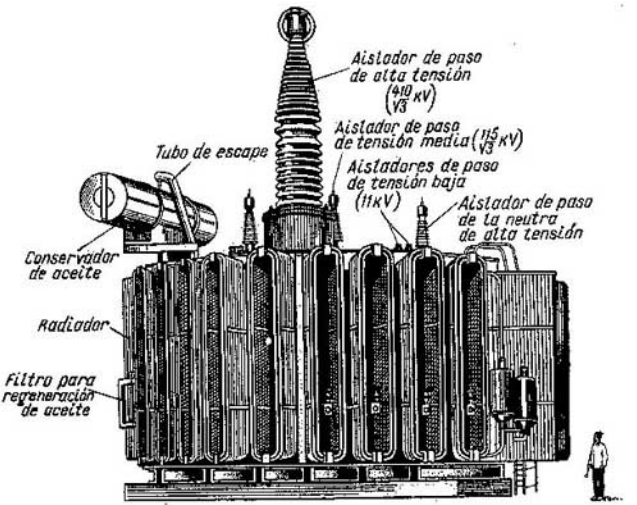


Fig. 213. Transformador monofásico de tres devanados

Los transformadores ОДТГ-90.000/400 están instalados en las subestaciones reductoras de la línea transmisora eléctrica Kuibishev — Moscú.

La potencia de un grupo de tres transformadores monofásicos de este tipo es de 270.000 kVA.

Actualmente se fabrican transformadores para 400 kV, de 50, 67, 83 y 90 mil kVA de potencia en fase.

Designación de los tipos de transformadores de potencia:

О — monofásico;
Т — trifásico;
С — con refrigeración por aire (seco);
М — de aceite con refrigeración natural por aire;
Д — de aceite con refrigeración artificial por aire (ventilación);
Т — de tres devanados (que tiene un devanado primario y dos secundarios por fase);
Г — de pararrayos (que dispone de protección de la aislación contra carga disruptiva al caer un rayo);
У — hermetizado.

Las cifras que siguen a las siglas muestran: la primera (en el numerador), la potencia en kVA, la segunda (en el denominador), la tensión primaria nominal en kV.

Ejemplos.

ТС-320/10 — transformador trifásico con refrigeración por aire (seco) de 320 kVA de potencia, tensión primaria, 10 kV;

ТМ-5600/35 — transformador trifásico de aceite con refrigeración natural por aire, 5.600 kVA, 35 kV;

ТМУ-50/6 — transformador trifásico de aceite, hermetizado, 50 kVA, 6 kV.

ОДТТ-90.000/400 — transformador monofásico de aceite con refrigeración artificial por aire (ventilación), de tres devanados, de pararrayos, de 90.000 kVA de potencia, 400 kV.

§ 114. Transformadores trifásicos

Para la transformación de la corriente trifásica se pueden emplear transformadores monofásicos. En la fig. 214 se da el esquema de conexión de tres transformadores monofásicos a la red de corriente

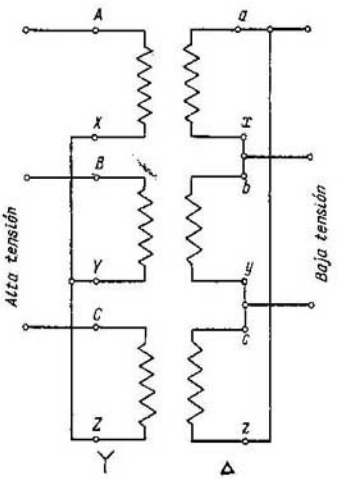


Fig. 214. Empleo de transformadores monofásicos en las redes de corriente trifásica

trifásica. La deficiencia consiste en los grandes gastos de acero de transformadores para los núcleos de los tres transformadores.

Si reunimos el acero de los tres núcleos en uno común, obtendremos el núcleo del transformador trifásico. Los gastos de acero para un transformador trifásico son considerablemente menores que los necesarios para la construcción de tres monofásicos. En la fig. 215

se muestra un transformador trifásico de potencia con refrigeración natural por aceite.

Los esquemas standard de conexiones de los devanados de transformadores trifásicos se muestran en la fig. 216. La disposición de los terminales en la tapa del transformador (vista desde arriba)

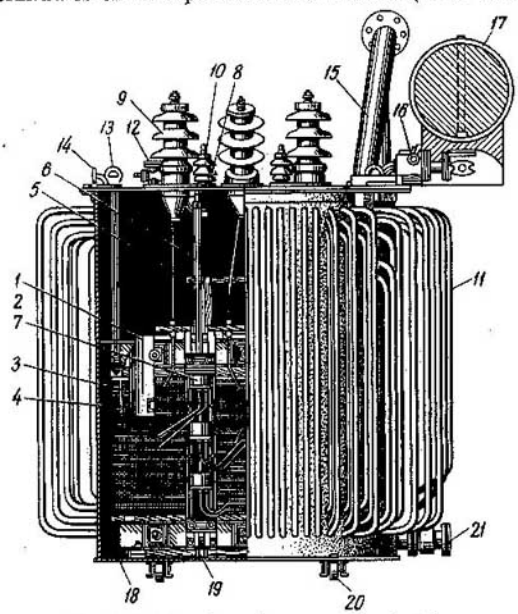


Fig. 215. Transformador con caja de tubos:
1 — conductor magnético de juntas contrapeadas, *2* — vigueta que prensa la culata, *3* — devanado de baja tensión, *4* — devanado de alta tensión, *5* — derivaciones de alta tensión, *6* — derivaciones de baja tensión, *7* — conmutador encajado de derivaciones de regulación del devanado de alta tensión, *8* — accionamiento del conmutador, *9* — borne (aislador) de alta tensión, *10* — borne (aislador) de baja tensión, *11* — caja tubular, *12* — entrada para cargar aceite, *13* — anillo para elevar la parte desarmable, *14* — tubuladura para acoplar la bomba de vacío, *15* — tubo de escape, *16* — relé de gas, *17* — conservador de aceite, *18* — escuadra de apoyo en el fondo de la caja, *19* — espárrago vertical que sujeta las viguetas que prensan las culatas, *20* — rodillo de transporte, *21* — grifo para evacuar el aceite

se muestra en la fig. 217. Los esquemas de la disposición de los devanados de transformadores trifásicos para dos grupos de conexiones se dan en la fig. 218.

Las designaciones Y/Y_0 — 12 y Y/Δ — 11 indican los esquemas y grupos de conexiones de los devanados de transformadores:

Y — conexión en estrella;

Y_0 — conexión en estrella con borne neutro;

Δ — conexión en triángulo.

Los comienzos de los devanados de fase de alta tensión se designan con letras A, B, C, los de baja, con a, b, c. Los finales se designan respectivamente con letras: X, Y, Z y x, y, z.

En la designación Y/Δ — 11 el primer signo Y indica que el devanado de alta tensión está conectado en estrella. El segundo signo Δ muestra que el devanado de baja tensión está conectado en triángulo. Los números 11 y 12 indican el desplazamiento angular

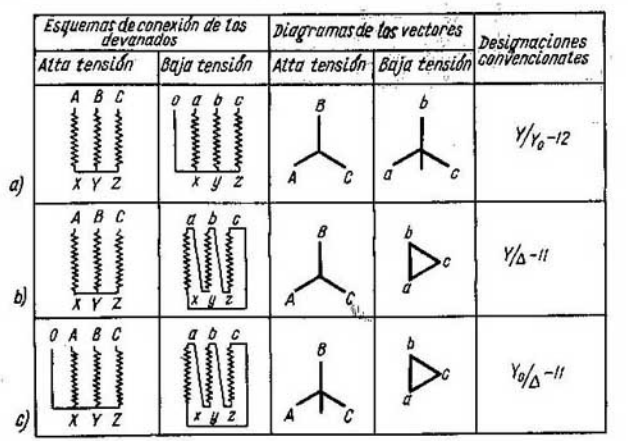


Fig. 216. Esquema de conexión de los devanados de transformadores trifásicos: *a* — estrella — estrella con punto neutro, *b* — estrella — triángulo, *c* — estrella con punto neutro — triángulo

de los vectores de tensiones compuestas de los devanados de tensiones alta y baja. Este corresponde al ángulo de desviación en sentido de las manecillas del reloj entre los vectores de tensiones compuestas de los devanados primario y secundario, adoptando un ángulo de 30° como unidad. Así, para el ángulo de desviación de 330°, el grupo de conexión será 330 : 30 = 11.

§ 115. Trabajo en paralelo de los transformadores

Si la potencia que es necesario transformar es mayor que la potencia de un transformador, en este caso se conectan varios transformadores en paralelo.

Trabajo de transformadores monofásicos en paralelo. Para la conexión en paralelo de los transformadores monofásicos es necesario cumplir las siguientes condiciones.

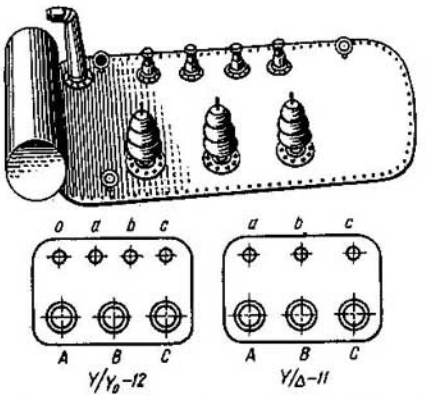


Fig. 217. Terminales de los devanados en la tapa de los transformadores (arriba: vista general de la tapa con terminales, abajo: esquema de la disposición de los terminales)

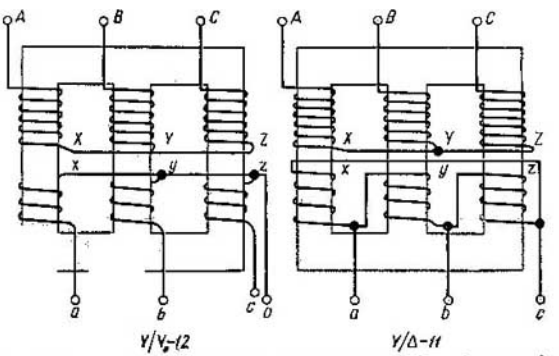


Fig. 218. Esquema de disposición de los devanados de transformadores trifásicos.

1. Las tensiones de los devanados primarios y secundarios de los transformadores que se conectan en paralelo deben ser iguales. En este caso las relaciones de transformación de los transformadores serán también iguales. Esta condición se puede escribir así:

$$U_{1I} = U_{1II};$$
$$U_{2I} = U_{2II};$$
$$k_I = k_{II}.$$

Si conectamos en paralelo transformadores con diferentes relaciones de transformación, sus f.e.m. secundarias serán diferentes. Pero en las barras secundarias no puede haber dos diferentes tensiones. Por eso la f.e.m. diferencial E creará en el circuito cerrado de los devanados secundarios una corriente que se denomina equilibradora.

Si la diferencia entre las relaciones de transformación es considerable, la corriente equilibradora puede resultar tan grande que el trabajo en paralelo de tales transformadores sea imposible.

Al cargar los transformadores con diferentes relaciones de transformación conectados en paralelo, por sus devanados fluirá una corriente igual a la suma geométrica de las corrientes de carga y equilibradora. Como muestran los cálculos, en este caso el transformador con menor relación de transformación estará más cargado. Para evitar el recalentamiento es necesario reducir la carga exterior y poner el transformador sobrecargado en condiciones normales de trabajo. El transformador con mayor relación de transformación estará cargado insuficientemente.

En la práctica, a veces hay que conectar en paralelo transformadores con diferentes relaciones de transformación.

Según la norma soviética se puede conectar en paralelo los transformadores, si la diferencia entre sus relaciones de transformación no supera el 0,5%.

2. La segunda condición para el trabajo en paralelo de los transformadores es la igualdad de tensiones de cortocircuito. El cálculo muestra, que durante el trabajo en paralelo de los transformadores con iguales relaciones de transformación y con iguales potencias, pero diferentes tensiones de cortocircuito U_c, la carga (corriente o potencia total) se distribuye entre los transformadores inversamente proporcional a U_c: el transformador con mayor U_c tomará la potencia menor.

En la práctica se permite conectar los transformadores en paralelo, si sus tensiones de cortocircuito se diferencian entre sí a no más de $\pm 10\%$ de su valor medio. Las potencias de los transformadores tienen que diferenciarse en este caso en no más de tres veces.

3. La tercera condición de trabajo en paralelo de los transformadores es la conexión con iguales fases, tanto en la tensión alta como baja.

La última condición se comprueba en la práctica del modo siguiente.

Supongamos que a un transformador monofásico *I* en funcionamiento (fig. 219) sea necesario conectar en paralelo otro transformador monofásico *II*. El transformador *II* se conecta por el lado de la tensión alta, y uno de los bornes de su devanado secundario se conecta a cualquier barra de tensión baja. Entre el segundo borne del devanado secundario del transformador *II* y la otra barra de tensión baja

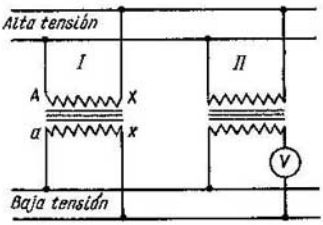


Fig. 219. Conexión para el trabajo en paralelo de los transformadores monofásicos

se intercala un voltímetro calculado para la doble tensión de la parte baja de los transformadores. Se pueden conectar ambos transformadores en paralelo, si el voltímetro indica cero.

Trabajo en paralelo de los transformadores trifásicos.

Para la conexión de los transformadores trifásicos en paralelo es necesario cumplir las mismas condiciones que para los transformadores monofásicos. La condición complementaria y obligatoria es la de observar la igualdad de los grupos de conexión para los transformadores trifásicos. Eso quiere decir que el transformador con grupo de conexión $Y/Y_0 - 12$ puede trabajar en paralelo sólo con otro del mismo grupo $Y/Y_0 - 12$.

§ 116. Autotransformadores

El autotransformador (fig. 220) es un transformador en cuyo núcleo hay sólo un devanado. En diferentes puntos de este devanado están conectados simultáneamente los circuitos primario y secundario. El flujo magnético del autotransformador induce una fuerza eléctrica en el devanado. Esta f.e.m. E es casi igual a la tensión conducida U_1.

Si la f.e.m. E se induce en el devanado con número de espiras w_1 en una espira la f.e.m. será igual a

$$\frac{E}{w_1}, \text{ o aproximadamente, } \frac{U_1}{w_1}.$$

Supongamos, por ejemplo, que en el circuito primario del autotransformador (fig. 220) la tensión $U_1 = 800$ V. El número total de espiras del devanado del autotransformador entre los puntos A

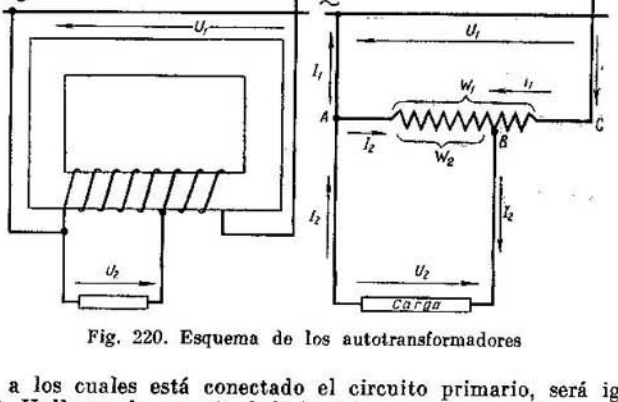


Fig. 220. Esquema de los autotransformadores

y C, a los cuales está conectado el circuito primario, será igual a 200. Hallemos la magnitud de la f.e.m. para una espira.

$$\frac{U_1}{w_1} = \frac{800}{200} = 4 \text{ V}.$$

Si es necesario obtener en el circuito secundario la tensión U_2 igual a 600 V, podemos hallar en el devanado dos puntos entre los cuales la tensión será de 600 V.

Si en una espira del devanado se induce 4 V, para obtener 600 V es necesario disponer del siguiente número de espiras:

$$w_2 = 600 : 4 = 150 \text{ espiras}.$$

Contando desde el comienzo del devanado (punto A) 150 espiras, conectamos el circuito secundario entre los puntos A y B.

Aquí se puede observar que

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

es decir, obtenemos exactamente la misma fórmula que hemos tenido para un transformador corriente. La relación de transformación será igual que antes:

$$k = \frac{U_1}{U_2}.$$

Ejemplo 6. El devanado del autotransformador tiene $w_1 = 1.200$ espiras y está conectado a una red de tensión $U_1 = 500$ V. ¿Qué tensión se puede obte-

ner en el circuito secundario, si entre sus extremos están incluidas 900 espiras?

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{w_1}{w_2}$$

$$U_2=\frac{U_1\cdot w_2}{w_1}=\frac{500\cdot 900}{1.200}=375 \text{ V}.$$

Bajo la influencia de la tensión U_1 en el devanado primario del autotransformador con w_1 espiras fluye la corriente I_1 (fig. 220). La tensión en los bornes del circuito secundario es igual a U_2. Si el circuito secundario está cerrado, por éste pasará la corriente I_2. Como cualquier otra corriente inducida, la I_2 está dirigida en sentido inverso a la causa que la ha producido, es decir, contra la corriente I_1.

Por consiguiente, en la parte común de espiras A — B del devanado del transformador fluye la diferencia geométrica de corrientes I_1 e I_2.

En los cálculos aproximados la diferencia geométrica se sustituye por la aritmética y se anota:

$$I=I_2-I_1.$$

El rendimiento del autotransformador es muy alto y por eso prácticamente se puede considerar la potencia del circuito primario igual a la del circuito secundario.

Ejemplo 7. Un autotransformador está conectado a una red de tensión $U_1 = 400$ V; $I_2 = 30$ A. En el circuito secundario, $U_2 = 300$ V. Determinar la corriente I_1 (fig. 220).

Primero determinamos la potencia del circuito primario P_1:

$$S_1=I_1\cdot U_1=30\cdot 400=12.000 \text{ VA}=12 \text{ kVA}.$$

Si no tomamos en cuenta las pequeñas pérdidas en el autotransformador, obtenemos la potencia del circuito secundario igual a 12 kVA. A condición de que el circuito secundario no contenga inductancia, la corriente I_2 será igual a:

$$I_2=\frac{S_2}{U_2}=\frac{12.000}{300}=40 \text{ A}.$$

Por la parte común de espiras A — B fluye la diferencia de corrientes I_2 e I_1:

$$I=I_2-I_1=40-30=10 \text{ A}.$$

Por consiguiente, en el sector A — B la sección del conductor para el devanado puede ser menor que en la parte restante del devanado. En estas condiciones un transformador corriente, para reducir la tensión desde 400 hasta 300 V, tendría dos devanados, es decir, mayor gasto de cobre y mayor costo.

Si en nuestro ejemplo la tensión secundaria U_2 en vez de ser de 300 V es de 350 V, es decir, no se diferencia en mucho de la tensión primaria, la corriente secundaria será igual a:

$$I_2=\frac{S_2}{U_2}=\frac{12.000}{350}=34{,}3 \text{ A}.$$

En este caso por el sector A — B fluirá una corriente aún menor:

$$I=I_2-I_1=34{,}3-30=4{,}3 \text{ A}$$

y la sección del conductor del devanado en el sector A — B puede ser aún menor. De lo expuesto se puede deducir, que cuanto menor es la diferencia entre la tensión secundaria y la primaria, tanto mayor es la ventaja del autotransformador ante un transformador corriente.

Tratemos de cambiar la tensión U_2 desde 300 hasta 200 V. Ahora la tensión secundaria será dos veces menor que la primaria. La corriente secundaria será igual a

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12.000}{200} = 60 \text{ A.}$$

La corriente en el sector A — B será:

$$I = I_2 - I_1 = 60 - 30 = 30 \text{ A,}$$

es decir, la misma que la corriente I_1. Por consiguiente, la sección del conductor para todo el devanado debe ser igual.

Vamos aún a reducir la tensión secundaria U_2 hasta 100 V. Ahora la tensión secundaria se diferenciará en más de dos veces de la primaria:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12.000}{100} = 120 \text{ A.}$$

La corriente en el sector A — B en este caso será:

$$I = I_2 - I_1 = 120 - 30 = 90 \text{ A.}$$

Ahora la sección de los conductores en el devanado en el sector A — B habrá que aumentarla en comparación con el sector B — C. En este caso resultará más ventajosa la utilización de un transformador corriente.

Ejemplo 8. El autotransformador tiene un devanado que consta de 1.500 espiras y está conectado a una red de 500 V de tensión. El circuito secundario tiene 1.200 espiras y está cortocircuitado a una resistencia no inductiva de 100Ω. Determinar la corriente que consume el autotransformador de la red, si el rendimiento es igual a 95%. Hallar la corriente para la cual deben ser calculados los sectores A — B y B — C (fig. 220).

La tensión secundaria U_2 la determinamos por la fórmula:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2},$$

de donde

$$U_2 = \frac{U_1 \cdot W_2}{W_1} = \frac{500 \cdot 1.200}{1.500} = 400 \text{ V.}$$

La corriente secundaria será igual a

$$I_2 = \frac{U_2}{R} = \frac{400}{100} = 4 \text{ A.}$$

Si $\cos \varphi_2 = 1$, la potencia del circuito secundario:

$$P_2 = I_2 \cdot U_2 = 4 \cdot 400 = 1.600 \text{ W.}$$

La potencia del circuito primario teniendo en cuenta el rendimiento del autotransformador:

$$P_1 = \frac{P_2}{\text{rend.}} = \frac{1.600}{0,95} \approx 1.685 \text{ W.}$$

La corriente del circuito primario que consume el autotransformador de la red:

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{1.685}{500} = 3,37 \text{ A.}$$

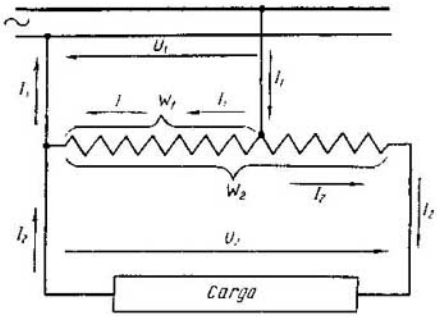


Fig. 221. Autotransformador elevador

La corriente en el sector B — C es igual a 3,37 A y en el sector A — B

$$I = I_2 - I_1 = 4 - 3{,}37 = 0{,}63 \text{ A}.$$

Además de los autotransformadores reductores hay también elevadores (fig. 221). En éstos la tensión secundaria U_2 es mayor que la primaria U_1 y la corriente en el sector común de los devanados (aproximadamente) es igual a:

$$I = I_1 - I_2.$$

La relación de transformación de un autotransformador elevador es siempre menor que la unidad:

$$k = \frac{U_1}{U_2}.$$

En las redes trifásicas se utilizan autotransformadores trifásicos (fig. 222).

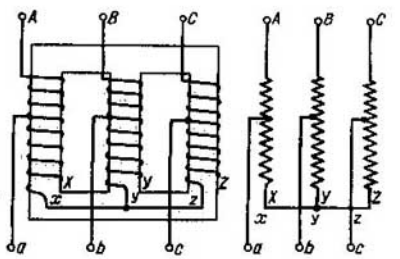


Fig. 222. Autotransformador trifásico: a la izquierda — esquema de construcción, a la derecha — esquema eléctrico

Los autotransformadores se emplean allí donde existe una diferencia pequeña entre la tensión primaria y la secundaria, es decir, cuando la relación de transformación es próxima a la unidad y, en todo caso, no mayor de dos. En este caso, los autotransformadores son más baratos, ligeros y económicos que los transformadores corrientes. Pero cuando la tensión secundaria se diferencia considerablemente de la primaria, el autotransformador pierde sus ventajas en la economía de metal y en la seguridad. Puesto que en el autotransformador los circuitos de los devanados de las tensiones alta y baja están conectados eléctricamente, el aislamiento del circuito de tensión baja tiene que ser idéntico al del circuito de tensión alta.

Problemas

1. Un transformador monofásico está conectado a una red de 220 V. El devanado primario del transformador tiene 800 espiras, el secundario, 46 espiras. Determinar la relación de transformación y la tensión del devanado secundario.
2. El devanado secundario del transformador mencionado en el problema anterior da una corriente de 8 A para las lámparas de incandescencia. Determinar la corriente que consume el transformador de la red, si su rendimiento es igual al 90%.
3. Una bobina con resistencia activa de 3Ω e inductiva de 20Ω está conectada a los bornes de un transformador, siendo la tensión de 24 V. El transformador está conectado a la red de 120 V; el rendimiento del transformador es igual al 92%. Determinar la corriente que consume el transformador de la red.
4. El devanado secundario del transformador trifásico da una potencia de 30 kVA; el rendimiento del transformador es igual al 95% y éste está conectado a una red de 3.000 V. Determinar la corriente del devanado primario.
5. El devanado de un autotransformador monofásico reductor tiene 800 espiras y está conectado a la tensión de 450 V. ¿En qué punto hay que hacer la derivación para el circuito secundario para reducir la tensión hasta 300 V?
6. La potencia útil del autotransformador mencionado en el problema anterior es igual a 2 kW; el rendimiento, 93%. Determinar la corriente primaria y la corriente que pasa en la parte común de las espiras.
7. Un autotransformador tiene rendimiento igual a 96% y está conectado a la red de 120 V. En su circuito secundario con carga no inductiva fluye una corriente de 8 A, siendo la tensión de 150 V. Determinar las corrientes en el circuito primario y en la parte común de las espiras.

Preguntas de control

1. Explíquese el principio de funcionamiento de un transformador.
2. Descríbase la construcción de un transformador.
3. ¿Para qué sirven los transformadores?
4. ¿Qué es la relación de transformación del transformador y cómo se determina?
5. ¿Cómo se dividen los transformadores según la construcción del conductor magnético (núcleo) y el modo de refrigeración?
6. ¿Cómo se conectan los devanados de transformadores trifásicos?
7. ¿Por qué al aumentar la carga del transformador crece la corriente del devanado primario?
8. ¿Cuál es la estructura de los autotransformadores, cómo funcionan y para qué sirven?

X

MOTORES ASINCRONICOS O DE INDUCCION

§ 117. Generalidades

Se llama máquina asincrónica a una máquina de corriente alterna, en la cual la velocidad de rotación del rotor es menor que la del campo magnético del estator y depende de la carga. La máquina asincrónica, igual que otras máquinas eléctricas, tiene la propiedad de ser reversible, es decir, puede funcionar como motor y como generador.

El motor asincrónico trifásico fue inventado por el ingeniero ruso M. Dolivo-Dobrovolsky en 1890 y, desde entonces, habiendo sido perfeccionado, ha ocupado sólidamente su puesto en la industria.

M. Dolivo-Dobrovolsky (1862—1919) ha enriquecido la ciencia rusa con invenciones y descubrimientos de importancia mundial. Es fundador de la tecnología de la corriente trifásica, inventor del electromotor asincrónico trifásico, del transformador trifásico, de la bobina equilibradora y del fasímetro; fue dirigente y constructor de la primera línea trifásica de transmisión de energía eléctrica en el mundo desde Laufen a Francfort del Maine (Alemania), de cerca de 170 km con tensión compuesta de 15.000 V (año 1891).

El motor asincrónico tiene dos partes principales: estator y rotor. El e s t a t o r es la parte de la máquina. En la parte interior del estator hay ranuras donde se coloca el devanado trifásico que se alimenta con corriente alterna trifásica. La parte giratoria de la máquina se llama r o t o r y en sus ranuras también se coloca un devanado. El estator y el rotor se arman de chapas estampadas de acero electrotécnico de 0,35 a 0,5 mm de espesor. Las chapas de acero se aíslan una de otra con una capa de barniz. El entrehierro se hace lo más pequeño posible (de 0,3 a 0,35 mm, en las máquinas de potencia baja, y de 1 a 1,5 mm, en las de potencia alta).

Según la construcción los motores asincrónicos suelen ser de rotor de jaula de ardilla y de rotor bobinado.

Los motores asincrónicos se dividen en: s i n c o l e c t o r y c o n c o l e c t o r. Los motores sin colector han adquirido mayor difusión. Estos se utilizan allí donde se necesita una velocidad de rotación aproximadamente constante y no se requiera su regulación.

Los motores sin colector son simples en construcción, funcionan sin fallas y son de alto rendimiento.

Para alcanzar amplia gama de velocidades y ciertas propiedades específicas se utilizan motores asincrónicos con colector monofásicos y trifásicos. Sin embargo, debido al alto costo, construcción complicada, condiciones difíciles de funcionamiento, las máquinas asincrónicas con colector se emplean poco y no las vamos a estudiar. Por lo cual, en lo sucesivo, al tratar de los motores asincrónicos, vamos a tener en cuenta solamente los motores sin colector.

§ 118. Principio de funcionamiento del motor asincrónico

Conectemos el devanado del estator a la red de corriente alterna trifásica. En el interior del estator surge un campo magnético giratorio. Las líneas magnéticas del campo cruzarán el devanado de corriente inmóvil del rotor e inducirán en éste la f.e.m. E_2, cuya frecuencia f_2 es igual a la f_1 de la corriente en el devanado del estator.

La f.e.m. inducida en la fase del devanado del rotor se determina por la fórmula:

$$E_{2s} = 4{,}44 k_2 f_2 W_2 \Phi_m,$$

donde $k_2 < 1$ = factor del bobinado que toma en consideración la disminución de la f.e.m. del rotor, debido a la adición geométrica de las f.e.m. inducidas en cada uno de sus conductores, y a la reducción del paso del devando del rotor;

f_2 = frecuencia de la corriente en el devanado del rotor;

w_2 = número de espiras del devanado de la fase del rotor;

Φ_m = magnitud máxima del flujo magnético del estator.

Bajo la acción de la f.e.m. E_{2s} en el devanado del rotor fluirá la corriente I_2, cuya magnitud se puede determinar por la fórmula:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{z_{s2}} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + x_{s2}^2}},$$

donde R_2 = resistencia activa del devanado de fase del rotor;

x_{s2} = reactancia inductiva de dispersión de la fase del devanado del rotor.

La reactancia inductiva de dispersión x_{s2} depende de la frecuencia de la corriente y se determina por la fórmula:

$$x_{s2} = 2\pi f_2 L_{s2},$$

donde L_{s2} = inductancia de dispersión de la fase del devanado del rotor.

En el momento de poner en marcha el motor, cuando el rotor aún está inmóvil, la frecuencia de la corriente en el devanado del rotor es máxima ($f_2 = f_1$), y por eso la reactancia inductiva x_{s2}

tiene su valor máximo. Puesto que la f.e.m. E_2, inducida en el devanado del rotor en el momento de poner en marcha el motor, tiene el valor máximo, la corriente en el devanado del rotor I_2 supera la magnitud de la corriente nominal del motor de 2 a 7 veces. Las corrientes del rotor, interactuando con el campo megnético giratorio del estator, crean un par, bajo cuya acción el rotor comienza a girar en el sentido de rotación del campo del estator. En esto consiste el principio de funcionamiento de un motor asincrónico.

Es evidente que el rotor, durante su rotación, no puede alcanzar el campo magnético giratorio del estator. Si suponemos que el rotor tiene la misma velocidad de rotación que el campo magnético del estator, las corrientes en el devanado del rotor desaparecerán. La desaparición de las corrientes en el devanado del rotor provocará el cese de su interacción con el campo del estator, y el rotor comenzará a girar más lentamente que el campo giratorio del estator. Pero el campo giratorio del estator cruza una vez más el devanado del rotor y sobre este último actuará de nuevo un par. Por consiguiente, durante su rotación, el rotor siempre debe atrasarse de la velocidad de rotación del campo magnético del estator, es decir, girar asincrónicamente (no al unísono con el campo magnético), por lo cual estos motores han recibido la denominación de a s i n c r ó n i c o s.

Si designamos con n_1 la velocidad de rotacion del campo magnético giratorio del estator (velocidad de sincronismo), y con n_2, la velocidad de rotación del rotor del motor (velocidad de funcionamiento), su velocidad con relación al campo giratorio del estator será igual a la diferencia llamada d e s l i z a m i e n t o:

$$n_1 - n_2.$$

El deslizamiento es conveniente expresarlo en tanto por ciento de la velocidad de sincronismo y se designa con la letra s.

De este modo, el deslizamiento s será igual a:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100,$$

de donde

$$n_2 = n_1 (1 - s)/100.$$

Si, por ejemplo, la velocidad de sincronismo es de 1.500 r.p.m. y la de funcionamiento, 1.450 r.p.m., el deslizamiento será igual a:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 = \frac{1.500 - 1.450}{1.500} \cdot 100 = 3{,}3\%.$$

En el momento de poner en marcha el motor, cuando la velocidad de funcionamiento $n_2 = 0$, el deslizamiento será:

$$s = \frac{n_1}{n_1} \cdot 100 = 100\%.$$

Durante la marcha en vacío $n_2 \approx n_1$ por lo cual el deslizamiento será:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx 0.$$

El deslizamiento del motor asincrónico al aumentar la carga varía muy poco.

Cuanto mayor es la potencia del motor, tanto menor es su deslizamiento.

Ejemplo. Determinar en tanto por ciento el deslizamiento para un motor asincrónico de 6 polos, si su velocidad de funcionamiento es 960 r.p.m.:

$$n_1 = \frac{f_1 60}{p},$$

si $f_1 = 50$ c/s,

$$n_1 = \frac{50 \cdot 60}{3} = 1.000 \text{ r.p.m.};$$

el deslizamiento será:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 = \frac{1.000 - 960}{1.000} 100 = 4\%.$$

De modo que, una máquina asincrónica, funcionando en el régimen de motor, cambia la velocidad de sincronismo de $n = 0$ (momento de poner en marcha) a $n \approx n_1$ (marcha en vacío) y, respectivamente, el deslizamiento de $s = +1$ a $s = 0$.

El deslizamiento de un motor de potencia reducida con carga nominal suele ser de 3 a 6%, y el de los motores de gran potencia, de 1 a 3%.

Al cambiar la velocidad de funcionamiento del motor varía la frecuencia de las f.e.m. y de las corrientes en el devanado del rotor, lo que se desprende de la ecuación

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{p n_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s.$$

Al poner en marcha el motor:

$$s = 1; \qquad f_2 = f_1;$$

durante la marcha en vacío:

$$s \approx 0; \qquad f_2 \approx 0.$$

Por ejemplo, si $f_1 = 50$ Hz al poner en marcha tendremos: $f_2 = 50$ Hz. Si el deslizamiento $s = 2\%$, la frecuencia de la corriente en el rotor será:

$$f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0{,}02 = 1 \text{ Hz}$$

Como se ha mostrado más arriba, la magnitud de la f.e.m. inducida en el devanado del rotor es igual a:

$$E_{2s} = 4{,}44 f_2 W_2 k_2 \cdot \Phi_m.$$

Puesto que $f_2 = f_1 s$, la magnitud de la f.e.m. E_{2s} con un deslizamiento dado se expresará por la fórmula:

$$E_{2s} = 4{,}44 f_1 s w_2 k_2 \Phi_m = E_2,$$

donde E_2 = f.e.m. en la fase del devanado del rotor en el momento de la puesta en marcha (cuando $f_2 = f_1$).

La reactancia inductiva, que depende de la frecuencia, con un deslizamiento dado s, se determinará del modo siguiente:

$$x_{s2} = 2\pi f_2 L_{s2} = 2\pi f_1 s L_{s2},$$

donde $2\pi f_1 s L_{s2}$ = reactancia inductiva del devanado del rotor en el momento de poner en marcha el motor.

Después de examinar el funcionamiento del motor asincrónico, vamos a compararlo con un transformador. Tanto el motor, como el transformador dispone de dos devanados entre los cuales existe un enlace magnético. En el motor, el papel del devanado primario del transformador lo cumple el devanado del estator, el papel del secundario, el devanado del rotor. En el momento de poner en marcha el motor (o con el rotor frenado) ambos devanados están inmóviles y las frecuencias de las corrientes en éstos son iguales. La modificación del régimen de funcionamiento del devanado secundario del transformador se refleja en el trabajo de su devanado primario. Lo mismo se observa durante el funcionamiento del motor asincrónico.

El aumento de la carga en el árbol del motor provoca un incremento de la corriente en el devanado del rotor. Gracias al enlace magnético entre los devanados del estator y rotor, el incremento de la corriente en el devanado del rotor origina un incremento de la corriente en el devanado del estator. Por consiguiente, mediante un amperímetro intercalado en el circuito del estator, se puede juzgar sobre la carga del motor.

La diferencia entre el motor asincrónico y el transformador consiste en la construcción del circuito magnético. En el motor, los circuitos primario y secundario están separados por un entrehierro, lo que no ocurre en los transformadores de construcción corriente. Durante el funcionamiento del motor, el rotor, junto con su devanado, se encuentra en rotación. La frecuencia de la f.e.m. y de la corriente del rotor cambia en dependencia de la carga del motor, lo que no tiene lugar en un transformador.

§ 119. Par de arranque de un motor asincrónico

El desfasamiento de la corriente I_2 y la f.e.m. E_{2s} del rotor ejerce una gran influencia sobre la magnitud del par del motor asincrónico.

Estudiemos el caso, cuando la inductancia del devanado es pequeña y, por consiguiente, se puede despreciar el desfasamiento

(fig. 223,*a*). El campo magnético giratorio del estator está sustituido aquí por el campo de los polos N y S que giran, supongamos, en el sentido de las manecillas del reloj. Utilizando la regla de la mano derecha, determinamos el sentido de la f.e.m. y de las corrientes en el devanado del rotor. Las corrientes del rotor, interactuando con el campo magnético giratorio crean un par de arranque. Las direcciones de las fuerzas que actúan sobre los conductores con corriente, se determinan por la regla de la mano izquierda. Como

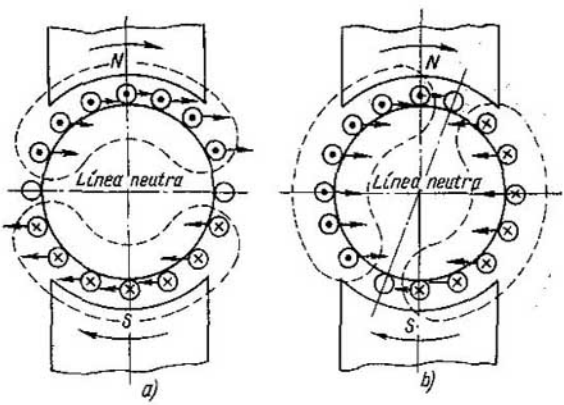


Fig. 223. Par de arranque en función del desfasaje entre la corriente y la f. e. m. del rotor

se ve en el dibujo, el rotor girará bajo la acción de las fuerzas en la misma dirección que el campo giratorio, es decir, en el sentido de las manecillas del reloj.

Estudiemos el segundo caso, cuando la inductancia del devanado del rotor es grande. En este caso el desfasamiento de la corriente del rotor I_2 y de la f.e.m. del mismo E_{2s} será también grande. En la fig. 223,*b*, el campo magnético del estator del motor asincrónico se muestra, como antes, en forma de los polos N y S que giran en el sentido de las manecillas del reloj. La dirección de la f.e.m. inducida en el devanado del rotor permanece igual que en la fig. 223,*a*, pero debido al retardo de la corriente en la fase, el eje del campo magnético del rotor ya no coincidirá con la línea neutra del campo del estator, sino que se desplazará en cierto ángulo contrario a la rotación del campo magnético. Por lo tanto, junto con la formación de un par de arranque orientado en un sentido, algunos conductores crearán otro par de arranque en dirrección contraria.

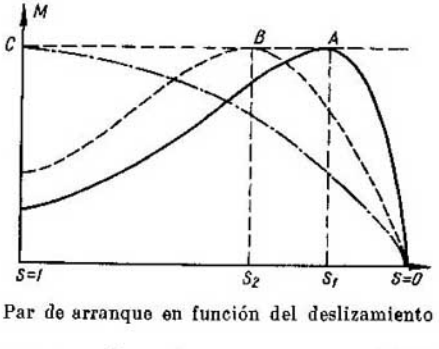


Fig. 224. Par de arranque en función del deslizamiento del motor

De aquí se ve, que el par de arranque general del motor durante el desfasamiento de la corriente y de la f.e.m. del rotor es menor, que para el caso cuando I_2 y E_{2s} coinciden en fase. Se puede demostrar que el par de arranque del motor asincrónico está condicionado solamente por la componente activa de la corriente del rotor, es decir, por la corriente $I_2 \cos \psi_2$ y que puede ser calculado por la fórmula:

$$M_{arr} = c\Phi_m I_2 \cos \psi_2,$$

donde

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{z_{s2}};$$

$$\cos \psi_2 = \frac{R_2}{z_{s2}};$$

Φ = flujo magnético del estator (también es aproximadamente igual al flujo magnético resultante del motor asincrónico);
ψ_2 = ángulo de desfasamiento de la f.e.m. y de la corriente de la fase del devanado del rotor;
c = coeficiente constante.

Después de la sustitución:

$$M_{arr} = c\Phi_m \frac{E_{2s}}{z_{s2}} \cdot \frac{R_2}{z_{s2}} = c_1 \Phi_m = \frac{E_{2s} R_2}{z_{s2}^2}.$$

Pero, puesto que

$$z_{s2}^2 = R_2^2 + (2\pi f_2 L_{s2})^2 = R_2^2 + (2\pi s f_1 L_{s2})^2,$$

las fórmulas del par se pueden representar en la siguiente forma definitiva

$$M_{arr} = c_2 \frac{sR^2}{R_2^2 + (2\pi f_1 s L_{s2})^2}.$$

De la última expresión se ve que el par de arranque de un motor asincrónico depende del deslizamiento.

En la fig. 224 está expuesta la curva A de la relación entre el par de arranque del motor y el deslizamiento. De la curva se desprende que en el momento de poner en marcha el motor, cuando $s = 1$, y $n = 0$, el par de arranque es pequeño. Esto se explica por el hecho de que en el momento de poner en marcha el motor, la frecuencia de la corriente en el devanado del rotor es máxima y la reactancia inductiva del devanado es grande. Por eso el cos ψ_2 es pequeño (0,1—0,2). Y a pesar de la gran magnitud de la corriente de arranque el par inicial será pequeño.

Al alcanzar el deslizamiento cierto valor s_1, el par de arranque del motor tendrá la magnitud máxima. Con la disminución ulterior del deslizameinto, o, en otras palabras, con el aumento ulterior de la velocidad de funcionamiento del motor su par se va reduciendo rápidamente y, cuando el deslizamiento $s = 0$, el par de arranque será también igual a cero.

Hay que tener en cuenta que un motor asincrónico no puede tener prácticamente deslizamiento igual a cero. Esto es posible sólo en el caso de que al rotor se le comunique de afuera un par de arranque en sentido del giro del campo del estator.

Se puede aumentar el par inicial de arranque si en el momento de arranque disminuimos el desfasamiento de la corriente y de la f.e.m. del rotor. De la fórmula

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_{s2}}{R_2}$$

se ve, que si aumentamos la resistencia activa, siendo constante la reactancia inductiva del devanado del rotor, la tg ψ_2 y el ángulo mismo ψ_2 disminuirán, lo que llevará al aumento del cos ψ_2 y del par de arranque del motor. Esto se emplea en la práctica para aumentar el par inicial de arranque del motor. En el momento de poner en marcha el motor, en el circuito del rotor se intercala una resistencia activa (reóstato de arranque), la cual se desconecta, una vez aumentada la velocidad del motor.

Como resultado del aumento del par inicial de arranque su valor máximo se obtiene cuando el deslizamiento es más grande (punto s_2 de la curva B en la fig. 224). Mediante un aumento de la resistencia activa del circuito del rotor durante la puesta en marcha, se obtiene un par de arranque máximo en el momento de arranque ($s = 1$ de la curva C).

El par de arranque del motor asincrónico es proporcional al cuadrado de la tensión, por consiguiente, inclusive una disminución insignificante de la tensión va acompañada por una reducción brusca del par de arranque.

La potencia P_1, proporcionada al devanado del estator del motor asincrónico, es igual a:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

donde m_1 = número de fases.

En el estator del motor hay las siguientes pérdidas de energía:

1) en el devanado del estator $P_{est} = m_1 I_1^2 R_1$;

2) en el acero del estator debido a la histéresis y a las corrientes parásitas P_c.

La potencia que se aplica al rotor representa la del campo magnético giratorio que se denomina también **potencia electromagnética** P_{em}.

La potencia electromagnética es igual a la diferencia entre la que se aplica al motor y las pérdidas en el estator del mismo, o sea,

$$P_{em} = P_1 - (P_c + P_{est}).$$

Se puede expresar también la potencia P_{em} en forma de la relación

$$P_{em} = \omega_1 M,$$

donde ω_1 = velocidad angular de rotación del flujo magnético del estator igual a $\frac{2\pi n_1}{60}$;

M = par de arranque en julios, desarrollado por el flujo magnético.

La potencia mecánica que desarrolla el rotor del motor será

$$P_2' = \omega_2 M,$$

donde ω_2 = velocidad angular de rotación del rotor igual a $\frac{2\pi n_2}{60}$.

La diferencia entre P_{em} y P_2' son las pérdidas eléctricas en el devanado del rotor, P_{er}, si no tomamos en cuenta las pérdidas en el acero del rotor, debido a que son insignificantes (la frecuencia de remagnetización del rotor es habitualmente muy pequeña):

$$P_{er} = P_{em} - P_2' = m_2 R_2 I_2^2.$$

El deslizamiento del motor es igual a:

$$S = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1},$$

de donde

$$S_1\omega = \omega_1 - \omega_2.$$

La potencia P_{er} puede ser expresada de otro modo:

$$P_{er} = P_{em} - P_2' = M\omega_1 - M\omega_2 = M(\omega_1 - \omega_2) = M\omega_1 s = sP_{em}.$$

Por consiguiente, las pérdidas en el devanado del rotor son proporcionales al deslizamiento del rotor.

Si restamos de la potencia mecánica P_2' que desarrolla el rotor, las pérdidas mecánicas P_{mec} causadas por la fricción en los cojinetes del rotor, el rozamiento contra el aire, etc., así como las pérdidas adicionales P_{ad} que surgen cuando hay carga y que están condicionadas por los campos de dispersión del rotor, y las pérdidas provocadas por las pulsaciones del campo magnético en los dientes del estator y del rotor, queda la potencia útil en el árbol del motor, la cual designaremos con P_2.

El rendimiento del motor asincrónico puede ser determinado por la fórmula:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - (P_{mec} + P_c + P_{est} + P_{ad} + P_{er})}{P_1}.$$

Más arriba hemos hallado la expresión del par de arranque del motor asincrónico. Vamos a obtener la misma expresión de otro modo.

La potencia electromagnética P_{em} puede ser expresada por la fórmula que sigue:

$$P_{em} = m_1 E_2' I_2' \cos\psi_2 = m_2 E_{2s} I_2 \cos\psi_2,$$

donde E_2' = f. e. m. del rotor referida al estator, y es igual a

$$E_2' = E_2 \frac{w_1 k_1}{w_2 k_2},$$

donde w_1 = número de espiras del devanado de la fase del estator;
w_2 = número de espiras del devanado de la fase del rotor;
k_1 = factor del bobinado del estator;
k_2 = factor del bobinado del rotor;
I'_2 = corriente del rotor referida al estator, y es igual a

$$I_2' = I_2 \frac{m_2 w_2 k_2}{m_1 w_1 k_1};$$

ψ = ángulo de desfasamiento de la corriente de fase del rotor y de su f. e. m.

Anteriormente hemos hallado la expresión para la f. e. m. del rotor:

$$E_{2s} = 4{,}44 k_2 s f_1 w_2 \Phi_m.$$

Reemplazando la magnitud E_{2s}, cuando $s = 1$, en la fórmula de P_{em}, obtendremos:

$$P_{em} = 4{,}44 m_2 k_2 f_1 w_2 I_2 \Phi_m \cos \psi_2 = \omega_1 M,$$

de donde

$$M = \frac{4{,}44 m_2 k_2 f_1 w_2}{\omega_1} \Phi_m I_2 \cos \psi_2.$$

Designando una parte de esta expresión con un número constante

$$c_3 = \frac{4{,}44 m_2 k_2 f_1 w_2}{\omega_1},$$

obtenemos:

$$M = c_3 \Phi_m I_2 \cos \psi_2.$$

De la última expresión se ve, que el par de arranque del motor asincrónico es proporcional al producto de la cantidad del flujo magnético en rotación por la corriente del rotor y por el coseno del ángulo entre la f. e. m. del rotor y su corriente.

De la fórmula $P_{er} = M\omega_1 s$ tenemos:

$$M = \frac{P_{er}}{\omega_1 s} = \frac{m_2 I_2^2 R^2}{\omega_1 s} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{\omega_1 s}.$$

La última expresión muestra que el par de arranque del motor asincrónico es proporcional a las pérdidas por efecto Joule ($I_2^2 R_2$) en el devanado del rotor.

Del esquema de sustitución del motor asincrónico se obtiene el valor de la corriente reducida del rotor, que exponemos sin demostración:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + c_1 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}},$$

donde R_1 = resistencia activa del devanado del estator;
x_1 = reactancia inductiva del devanado del estator;
R_2' = resistencia activa del devanado del rotor referida al estator;
x_2' = reactancia inductiva del devanado del rotor referida al estator;
c_1 = coeficiente, cuyo valor es de 1,02 a 1,05.

Colocando la expresión de la corriente reducida del rotor en la última fórmula del par de arranque, obtendremos:

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{s\omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]}.$$

La ecuación del par de arranque muestra que el par del motor es proporcional al cuadrado de la tensión U_1^2.

§ 120. Motor asincrónico con rotor de jaula de ardilla

El motor asincrónico con rotor de jaula de ardilla (figs. 225, 226) es el más difundido entre los motores que se emplean en la industria.

La construcción del motor asincrónico es como sigue. En la parte fija del motor, el estator *1* (fig. 226), se dispone el devanado trifásico *2*, que se alimenta con corriente trifásica. Los comienzos de las tres fases de este devanado se montan en un tablero común fijado a la parte exterior del cuerpo *3* del motor.

Puesto que por los devanados del estator fluye la corriente alterna, por el acero del estator pasará un flujo magnético alterno. Para reducir las corrientes parásitas que surgen en el estator, éste se hace de chapas de acero aleado de 0,35 y 0,5 mm de espesor. Las chapas están aisladas una de otra con barniz. Las chapas con ranuras estampadas para el devanado se unen una a otra con pernos, aislados del estator. El núcleo armado del estator va fijado en el cuerpo de hierro fundido *3* del motor.

La parte giratoria del motor, el rotor *4*, es armada también de chapas de acero. En las ranuras del rotor se colocan barras de cobre que se sueldan por ambos extremos a los anillos de cobre *5*.

El devanado de semejante rotor, por su aspecto exterior, parece una «jaula de ardilla» (fig. 227,*a*).

Actualmente en todos los motores de hasta 100 kW de potencia la «jaula de ardilla» se hace de aluminio moldeado a presión en las ranuras del rotor (fig. 227,*b*).

El árbol del rotor *6* (fig. 226) gira en los cojinetes fijados en las cajas *7* y *8*. Por medio de pernos, las cajas se fijan al cuerpo del motor. Sobre un extremo del árbol del rotor se pone una polea para transmitir la rotación a las máquinas. El arranque del motor con rotor de jaula de ardilla es muy sencillo. Para eso es necesario conectar mediante un interruptor de cuchilla (u otro dispositivo de arranque) el devanado del estator a la red y el rotor comienza a girar. Durante la puesta en marcha, el motor toma de la red una corriente de arranque que es de 5 a 7 veces mayor que la que consume el motor durante el funcionamiento normal (corriente nominal).

Grandes corrientes de arranque de los motores producen grandes caídas de tensión en la red, lo que se refleja perjudicialmente en el funcionamiento de otros consumidores.

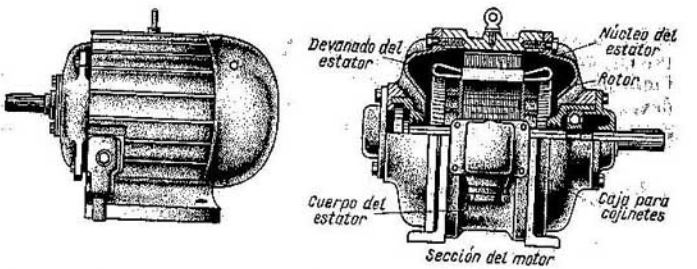


Fig. 225. Aspecto general y corte de un motor asincrónico con rotor de jaula de ardilla

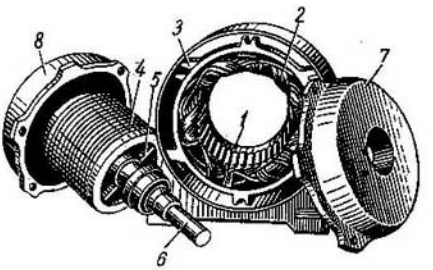


Fig. 226. Motor asincrónico con rotor de jaula de ardilla desarmado

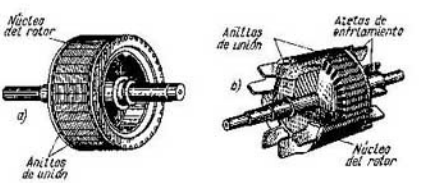


Fig. 227. Aspecto exterior y corte parcial de un rotor de jaula de ardilla: a — rotor con devanado en «jaula de ardilla», b — rotor en cortocircuito revestido de aluminio

En el momento de arranque, cuando la frecuencia de la corriente del rotor es igual a la del estator, la reactancia inductiva del devanado del rotor es grande, el ángulo de desfasamiento ψ_2 entre la f.e.m. E_{2s} y la corriente del rotor I_2 es también grande. Por eso, el par inicial de arranque del motor será pequeño. Más arriba ha sido indicado, que al aumentar la resistencia activa del circuito del devanado del rotor se puede aumentar el par de arranque del motor. Se podría hacer el devanado del rotor con una resistencia mayor,

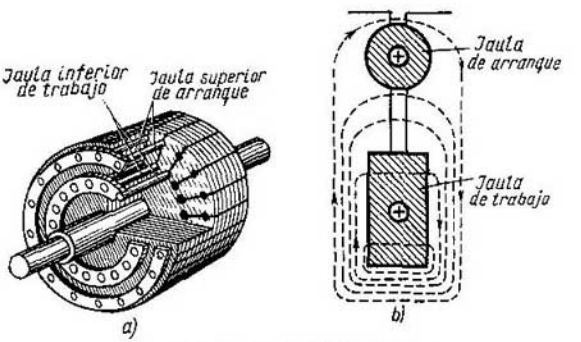


Fig. 228. Rotor de doble jaula:
a — aspecto general con corte parcial, b — corte de una ranura

pero eso provocaría un mayor calentamiento del devanado y la disminución del rendimiento del motor. Para mejorar las características de arranque de los motores asincrónicos con rotor de jaula de ardilla se emplean motores con dos devanados de jaula de ardilla en el rotor y motores con ranura profunda.

El motor de doble jaula fue propuesto por Dolivo-Dobrovolsky. En el rotor de tal motor están alojadas dos jaulas (fig. 228): una, de arranque, cuya resistencia activa es grande y la reactancia inductiva pequeña, y otra, de trabajo, que dispone de una resistencia activa pequeña y de una reactancia inductiva grande.

Las barras de la jaula de arranque suelen fabricarse de latón al manganeso. Para la jaula de trabajo se utiliza cobre rojo. La sección de la jaula de trabajo se hace mayor que la de la jaula de arranque. Seleccionando el material y las secciones de las jaulas se obtiene una resistencia de la jaula de arranque cuatro o cinco veces mayor que la de la jaula de trabajo.

Como se ve en la fig. 228, *b*, entre las barras de las jaulas de arranque y las de trabajo hay un intersticio estrecho, cuyas dimensiones determinan la inductancia de la jaula interior de trabajo.

Vamos a examinar el trabajo de un motor de doble jaula.

En el momento de poner en marcha el motor, cuando la frecuencia de las corrientes del rotor es igual a la de la red, el flujo magnético de dispersión de la jaula de trabajo es grande y, por lo tanto, la inductancia de la misma es también grande. Por eso, el desfasamiento de la corriente de la jaula de trabajo y de la f.e.m. inducida en ésta será grande, y el par de arranque que crea la jaula, pequeño. Debido a la gran resistencia activa y pequeña inductancia de la jaula de arranque, la corriente y la f.e.m. inducidas en ésta tendrán un desfasamiento insignificante y el par de arranque que desarrolla será grande. Por consiguiente, al poner en marcha el motor, el par de arranque se produce preferentemente a cuenta de la jaula de arranque.

Al aumentar la velocidad del motor, la frecuencia de las corrientes del rotor disminuye, la reactancia inductiva de las jaulas

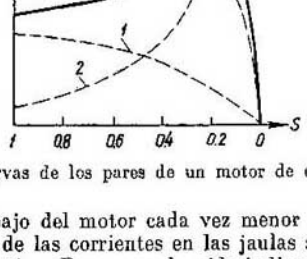


Fig. 229. Curvas de los pares de un motor de doble jaula

ejerce sobre el trabajo del motor cada vez menor influencia, y por eso la distribución de las corrientes en las jaulas se determina sólo por su resistencia activa. Pero como ha sido indicado anteriormente, la resistencia activa de la jaula de trabajo es varias veces menor que la resistencia de la de arranque. Por consiguiente, durante el trabajo normal del motor la mayor parte de la corriente pasa por la jaula de trabajo y el par de arranque se produce preferentemente a cuenta de ésta.

En la fig. 229 se muestra el par de arranque en función de la magnitud de deslizamiento de un motor de doble jaula. En el diagrama, la curva *1* muestra la variación del par que crea el devanado de arranque; la curva *2*, la variación del par que crea el devanado de trabajo. La suma de los valores instantáneos de los pares de los dos devanados forma la curva *M* del par del motor de doble jaula.

Más sencillo en su fabricación es el rotor cuyas dos jaulas están revestidas de aluminio. En la fig. 230 se muestra el aspecto exterior y la sección parcial de un rotor con doble jaula fundida de aluminio.

El motor de doble jaula es un 20 ó 30% más caro que el asincrónico con rotor de jaula de ardilla de construcción corriente. Las fábricas de la URSS producen motores de doble jaula, de 5 a 2.000 kW.

Además de los motores de doble jaula, se utilizan los motores con ranura profunda (fig. 231). La relación entre la longitud de la ranura y su ancho se toma en los límites de 10 a 12. En el momento de arranque la parte inferior de la ranura está embragada con un número de líneas magnéticas del flujo de dispersión mayor que la parte superior de la misma. Por eso la reactancia inductiva de la parte inferior de la ranura es mayor que la de la parte superior. Esto lleva a que se desaloje la corriente del rotor a la parte superior de la barra del devanado. La densidad de la corriente en las capas

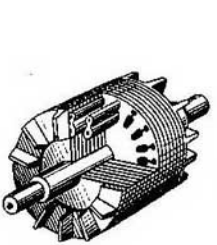


Fig. 230. Rotor con doble jaula de aluminio

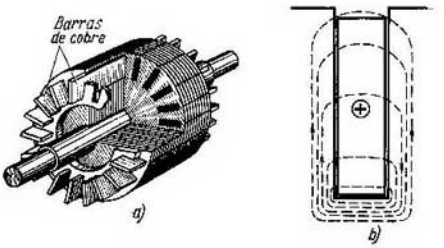


Fig. 231. Rotor con ranura profunda: *a* — aspecto general con corte parcial, *b* — corte de una ranura

superiores de la barra aumenta, lo que equivale a la reducción de la sección de las barras y al aumento de la resistencia activa del devanado. Como es sabido, esto lleva al incremento del par de arranque del motor. Además, el aumento de la reactancia inductiva del devanado del rotor provoca la disminución de la corriente de arranque. Al aumentar la velocidad, el motor adquiere propiedades que corresponden a su construcción normal.

En la tabla 17 están representadas las características de arranque del motor con rotor de jaula de ardilla de fabricación normal, de un motor de doble jaula y de un motor con ranura profunda. Las

Tabla 17

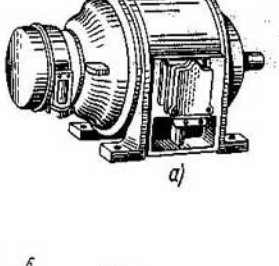
Características de arranque de los motores con rotor en jaula de ardilla

Motor de fabricación normal		Motor de doble jaula		Motor con ranura profunda	
$\frac{I_{arr}}{I_n}$	$\frac{M_{arr}}{M_n}$	$\frac{I_{arr}}{I_n}$	$\frac{M_{arr}}{M_n}$	$\frac{I_{arr}}{I_n}$	$\frac{M_{arr}}{M_n}$
4-7	0,8-1,2	3,3-5,5	1-2	4-4,8	1,2-1,5

propiedades de arranque se dan en forma de relación entre la corriente de arranque I_{arr} y la corriente nominal I_n y en forma de relación entre el par inicial M_{arr} y el par nominal M_n.

§ 121. Motor asincrónico de rotor bobinado

Analizando las deficiencias de los motores asincrónicos con rotor de jaula de ardilla conviene señalar que es difícil regular su velocidad de rotación y que su corriente de arranque es grande. Estas



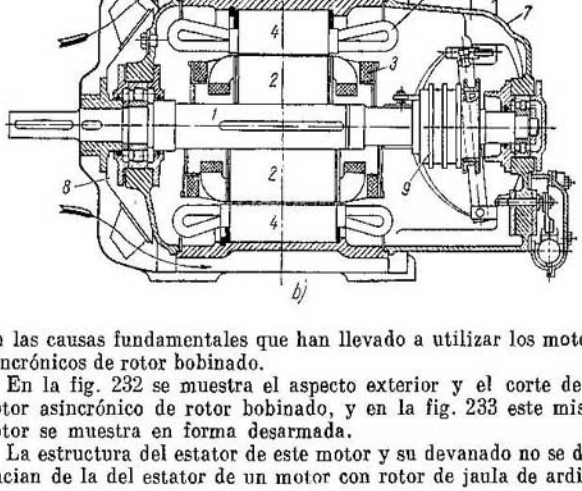


Fig. 232. Motor asincrónico de rotor bobinado:

a — aspecto exterior, *b* — corte longitudinal del motor, la mitad superior corresponde a la ejecución para $n = 1.500$ r.p.m.; la inferior, para $n_1 = 1.000$ r.p.m.; *1* — árbol, *2* — acero del rotor, *3* — devanado del rotor, *4* — acero del estator, *5* — devanado del estator, *6* — armazón del estator, *7* — cajas para cojinetes, *8* — ventilador, *9* — anillos rozantes (colectores), *10* — empuñadura para levantar las escobillas

son las causas fundamentales que han llevado a utilizar los motores asincrónicos de rotor bobinado.

En la fig. 232 se muestra el aspecto exterior y el corte de un motor asincrónico de rotor bobinado, y en la fig. 233 este mismo motor se muestra en forma desarmada.

La estructura del estator de este motor y su devanado no se diferencian de la del estator de un motor con rotor de jaula de ardilla.

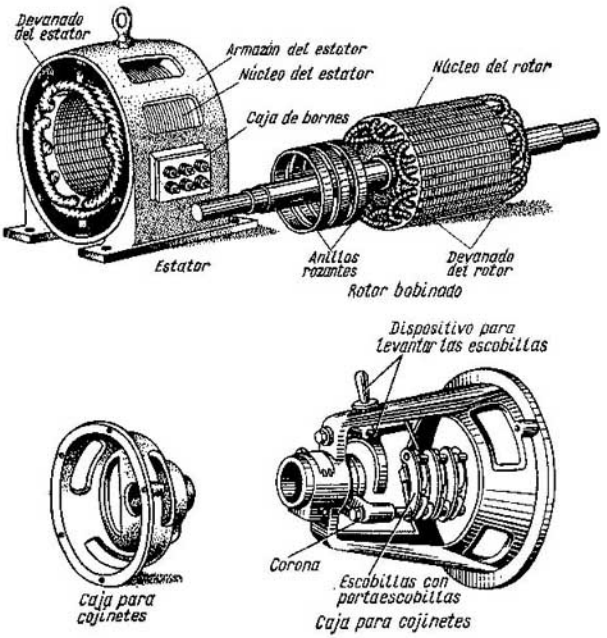


Fig. 233. Motor asincrónico de rotor bobinado desarmado

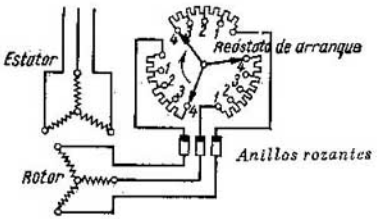


Fig. 234. Esquema de conexión de un motor asincrónico de rotor bobinado con un reóstato de arranque

La diferencia entre estos dos motores consiste en la construcción del rotor. El electromotor de rotor bobinado tiene un rotor en el cual están alojados, igual que en el estator, tres devanados de fase montados en estrella (más raramente, en triángulo). Los extremos de los devanados de fase del rotor se unen a tres anillos rozantes de cobre, fijados en el árbol del rotor y aislados tanto entre sí, como del núcleo de acero del rotor.

Anteriormente hemos indicado que al introducir la resistencia activa en el circuito del rotor, disminuye la corriente de arranque del motor y aumenta el par de arranque del mismo. Para este fin los motores de rotor bobinado disponen de un reóstato de arranque (fig. 234) unido con el devanado del rotor mediante escobillas puestas sobre los anillos rozantes. Al poner en marcha el motor, se adiciona la resistencia total del reóstato (esta posición se muestra en la fig. 234). A medida que vaya aumentando la velocidad de rotación del rotor la resistencia del reóstato disminuye gradualmente y, cuando, al fin, el motor alcanza su velocidad normal, la resistencia del reóstato se elimina completamente; el reóstato se pone en cortocircuito.

En algunas construcciones de motores de rotor bobinado hay un dispositivo que permite cerrar los anillos rozantes o colectores y levantar las escobillas.

§ 122. Propiedades de los motores asincrónicos y su empleo

Las ventajas de los electromotores asincrónicos con rotores de jaula de ardilla son: 1) velocidad aproximadamente constante para diferentes cargas; 2) posibilidad de soportar grandes sobrecargas; 3) sencillez en la construcción; 4) sencillez de arranque y la posibilidad de su automatización; 5) cos φ y rendimiento más altos que en los motores de rotor bobinado.

Defectos: 1) dificultad en regular el número de revoluciones; 2) gran corriente de arranque; 3) cos φ bajo, cuando la carga es poca; 4) sensibilidad a las oscilaciones de la tensión.

Prácticamente los electromotores asincrónicos con rotor de jaula de ardilla se emplean cuando no se necesita regular la velocidad de rotación del motor y cuando las potencias de los motores no son grandes.

Las ventajas de los electromotores asincrónicos de rotor bobinado son: 1) gran par de arranque inicial; 2) posibilidad de grandes sobrecargas; 3) velocidad aproximadamente constante, con cargas diferentes; 4) menor corriente de arranque en comparación con los motores de jaula de ardilla; 5) posibilidad de utilizar dispositivos de arranque automáticos.

Inconvenientes: 1) sensibilidad a las oscilaciones de la tensión; 2) cos φ y rendimiento menores que en los motores de jaula de ardilla; 3) cos φ bajo en caso de cargas pequeñas.

Prácticamente, los electromotores asincrónicos de rotor bobinado se emplean cuando no se necesita una regulación gradual y amplia de la velocidad y las potencias de los motores son grandes.

La capacidad de los motores eléctricos de soportar sobrecargas se caracteriza por la relación entre el par máximo del motor $M_{máx}$ y su par nominal M_n. Dependiendo de la magnitud de la potencia y del uso del motor, $\frac{M_{máx}}{M_n}$ oscila en los límites de 1 a 3,4.

§ 123. Disposición de los devanados del estator y del rotor en los motores asincrónicos

Para obtener un campo magnético giratorio, en el estator del motor se dispone un devanado trifásico. El devanado se aloja en las ranuras y consta de varias bobinas conectadas entre sí. Cada bobina está hecha de una o varias espiras del conductor, aisladas entre sí y de las paredes de la ranura. El aislamiento de los devanados depende de la magnitud de la tensión, de la temperatura para la cual se calcula el devanado, de la forma y de las dimensiones de la ranura, así como del tipo de devanado. Si en la ranura se aloja un lado de la bobina, el devanado se denomina *de un piso* (capa), si dos, de *dos pisos*. La bobina puede ser fabricada de varias secciones que, a su vez, constan de una o varias espiras. En la fig. 235 se representa una bobina de dos secciones, cada una de las cuales se compone de tres espiras. Si designamos con z el número total de ranuras del estator, con $2p$, el número de polos, el número de ranuras correspondientes a una fracción de polos será igual a:

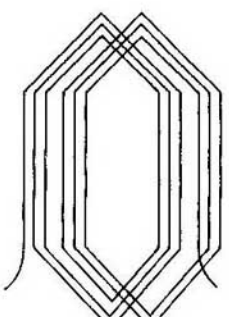


Fig. 235. Bobina del devanado de dos secciones

$$Q = \frac{z}{2p}.$$

La fracción polar τ es el arco de circunferencia del estator o rotor entre los ejes de dos polos vecinos. Las ranuras de las tres fases deben encontrarse a la distancia de una fracción polar. Por consiguiente, el número de ranuras que corresponden al polo y a la fase del devanado trifásico será igual a:

$$q = \frac{Q}{3} = \frac{z}{3 \cdot 2p}.$$

Se denomina **paso del devanado** y, la distancia entre el comienzo y el fin de la bobina (o sección del devanado). El paso

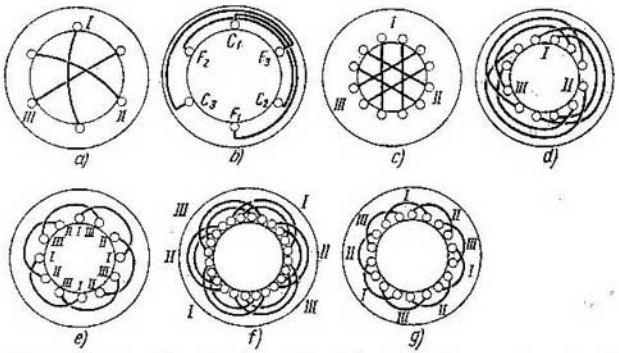


Fig. 236. Diferentes tipos de devanados del estator de un motor asincrónico

del devanado se expresa en partes de la fracción polar τ o por el número de ranuras. En los devanados de dos pisos la anchura de la sección suele ser menor que τ (paso corto o reducido), lo que permite emplear mejor el cobre del devanado.

En la fig. 236,*a* se muestra un devanado del estator de un motor asincrónico. En este devanado cada bobina está compuesta de dos conductores. Pero al arrollar gran número de espiras, los conductores cerrarán el estator desde el interior y será imposible colocar el rotor en su sitio. Doblando los conductores a los lados obtendremos el devanado que se muestra en la fig. 236,*b*. El devanado compuesto de tres bobinas crea un campo magnético con dos polos. Durante un ciclo de la corriente trifásica, el campo magnético girará una

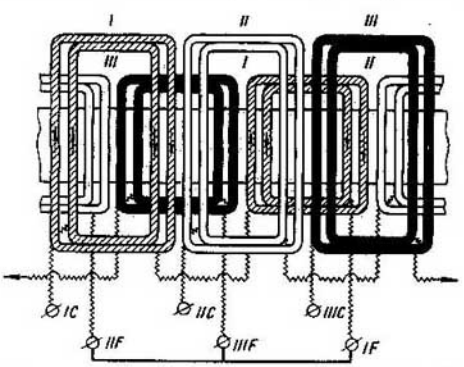


Fig. 237. Esquema desplegado de un devanado trifásico de un piso

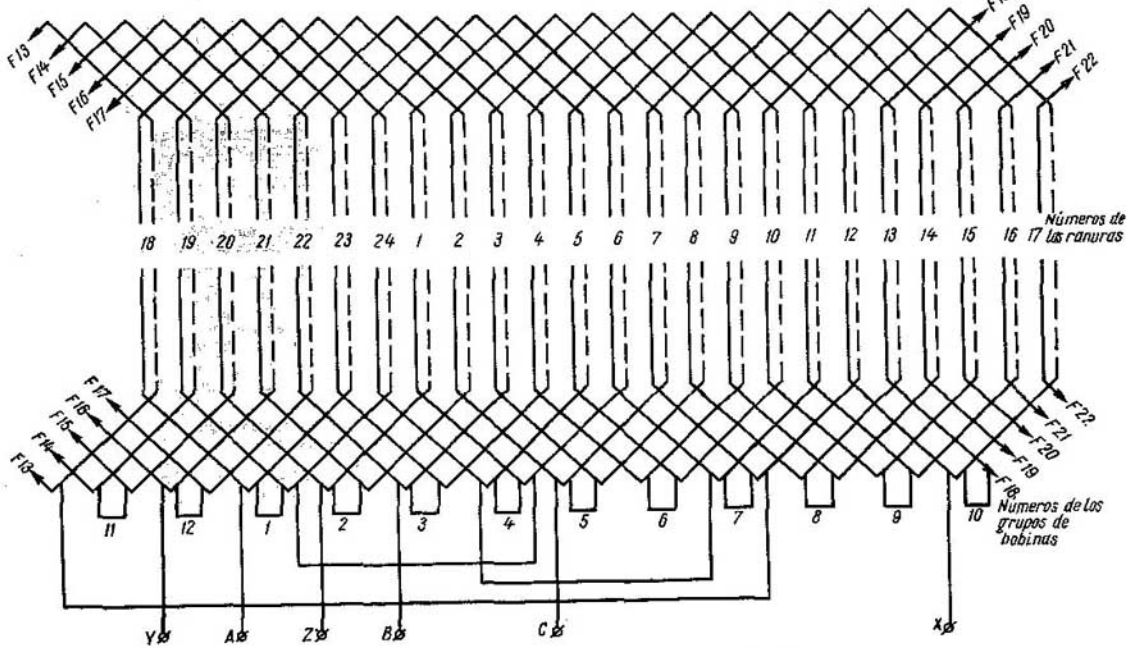


Fig. 238. Esquema desplegado de un devanado trifásico de dos pisos con paso corto

vez. Para la frecuencia de 50 Hz esto equivaldrá a 50 rev/seg, o sea, a 3.000 r.p.m.

En la fig. 236,*c* y *d* está representado un devanado, en el cual cada lado de la bobina se compone de dos conductores.

La velocidad de sincronismo de un estator tetrapolar es dos veces menor que la de un estator bipolar, es decir, es de 1.500 r.p.m. (para 50 Hz). El devanado de un estator tetrapolar con un conductor para el polo y la fase, se muestra en la fig. 236,*e*, y con dos conductores para el polo y la fase, en la fig. 236,*f*.

La velocidad de sincronismo de un estator hexapolar es tres veces menor que la de uno bipolar, es decir, 1.000 r.p.m. (para 50 Hz). El devanado de un estator hexapolar con un conductor para el polo y la fase se muestra en la fig. 236,*g*.

El número de todas las ranuras en el estator es el triple del producto del número de polos del estator por el número de ranuras que corresponden a un polo y una fase.

El esquema desplegado de un devanado trifásico de un piso se muestra en la fig. 237, y de un devanado imbricado de dos pisos con paso corto, en la fig. 238.

Seis terminales del devanado del estator están montados en el tablero de bornes del motor.

§ 124. Motores asincrónicos monofásicos

Los motores asincrónicos monofásicos tienen en el estator, a diferencia de los motores trifásicos, un devanado monofásico (fig. 239,*a*, *b* y *c*, devanado *A*). El rotor del motor monofásico tiene un devanado

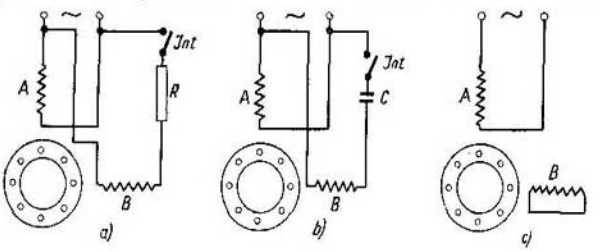


Fig. 239. Esquema de arranque de motores asincrónicos monofásicos:
a — en serie con el devanado de arranque está conectada una resistencia activa (motor de fase partida), *b* — en serie con el devanado de arranque está conectada una capacidad (motor de condensador), *c* — devanado de arranque — espiras en cortocircuito alojadas en las ranuras del estator (motor con polos en sombra)

trifásico con anillos rozantes (colectores) o un devanado de jaula de ardilla. Más arriba ha sido indicado, que la corriente monofásica no crea un campo magnético giratorio. Por eso los motores monofásicos no disponen de par de arranque inicial. Para crear un par

inicial en el estator del motor se coloca otro devanado, llamado de arranque y desfasado 90° con respecto al devanado de trabajo o principal (fig. 239,*a* y *b*, devanado *B*). Los dos devanados se alimentan de la red de corriente monofásica. Para crear un desfasamiento de las corrientes de ambos devanados en un ángulo próximo a 90°, se conecta en serie con los devanados de arranque una resistencia activa o una capacidad (fig. 239,*a* y *b*). El devanado de arranque se conecta sólo para poner en marcha el motor y se desconecta de la red después de adquirir aquél la velocidad normal de rotación mediante un interruptor de cuchilla. El motor sigue trabajando con el devanado de trabajo.

En los motores monofásicos de potencia baja (0,5—30 W), el devanado de arranque es de espiras en cortocircuito (bobina de sombra) (fig. 239,*c*). En este caso en el estator hay polos salientes, una parte de los cuales está envuelta por espiras en cortocircuito. Las corrientes en tal devanado se inducen por el devanado de trabajo o principal.

En comparación con los motores trifásicos, los monofásicos asincrónicos tienen los siguientes inconvenientes: 1) ausencia del par de arranque inicial; 2) pequeña capacidad de soportar sobrecarga; 3) rendimiento más bajo; 4) menor factor de potencia (cos φ).

Preguntas de control

1. ¿Cuál es el principio de funcionamiento de un motor asincrónico?
2. ¿Qué es el deslizamiento del motor y cómo se determina?
3. ¿Cuál es la analogía entre un motor asincrónico y un transformador?
4. ¿De qué factores depende el par de arranque del motor asincrónico?
5. ¿Cuál es la estructura de un motor asincrónico con rotor de jaula de ardilla?
6. ¿Cuál es la estructura de motores de doble jaula y de motores con ranura profunda?
7. ¿Cuál es la estructura de los motores asincrónicos de rotor bobinado?
8. ¿Para qué al arrancar los motores asincrónicos de rotor bobinado en el circuito del rotor se introduce el reóstato de arranque?
9. ¿Cuál es la estructura de un motor asincrónico monofásico y cómo se conecta a la red?

XI

MAQUINAS SINCRONICAS

La máquina sincrónica es una máquina cuya velocidad de rotación es constante y se determina, para una frecuencia dada de corriente alterna, por la cantidad de pares de polos p:

$$n = \frac{60f}{p}.$$

De acuerdo con el principio de reversibilidad descubierto por E. Lenz, la máquina sincrónica puede funcionar tanto en régimen de generador como en el de motor.

§ 125. Generadores (alternadores) sincrónicos

El funcionamiento de los generadores sincrónicos se basa en el fenómeno de inducción electromagnética. En principio, es lo mismo si un conductor en movimiento cruza un campo magnético inmóvil, o si un campo magnético en movimiento interseca un conductor inmóvil. Obedeciendo a lo anterior, los generadores sincrónicos pueden ser construidos de dos tipos. En el primero de ellos se pueden colocar los polos magnéticos en el estator y alimentar su devanado con corriente continua, y los conductores alojarlos en el rotor y tomar de éstos la corriente alterna mediante anillos y escobillas.

A menudo, la parte de la máquina que crea el campo magnético se llama i n d u c t o r, y la parte donde se dispone el d e v a n a d o en el cual se induce la f.e.m., se denomina i n d u c i d o.

Por consiguiente, en el primer tipo de generador el inductor es fijo y el inducido gira.

Los generadores sincrónicos modernos se construyen para una tensión de hasta 18 kV. Es imposible tomar tensiones tan altas del devanado giratorio del inducido mediante contactos deslizantes, puesto que es difícil aislar un devanado de tan alta tensión. Además, para un inducido que gira, hacen falta tres anillos, y para un devanado inductor que gira, solamente dos. Si la potencia del inducido fuese grande, las dimensiones de sus tres anillos serían

bastante considerables. Por eso en los generadores modernos el devanado del inducido se dispone en la parte fija de la máquina, en el estator, y el devanado inductor (los polos magnéticos), en el rotor.

El esquema de un generador sincrónico bipolar de este tipo ha sido mostrado anteriormente (véase fig. 176). Para hacer girar el rotor del generador sincrónico se instala un motor primario. En calidad de motor primario se utiliza: una turbina de vapor (el generador con turbina se denomina turbogenerador), turbina hidráulica (hidrogenerador), motor de combustión interna, con frecuencia un motor Diesel (grupo Diesel), motor eléctrico (grupo motor-generador), etc. Las denominaciones de turbogenerador, hidrogenerador y generador Diesel se refieren, habitualmente, a un generador sincrónico.

§ 126. Estructura de los alternadores sincrónicos

1. Estator. El estator del alternador sincrónico, igual que el de otras máquinas de corriente alterna, consta de un núcleo armado de chapas de acero electrotécnico, en cuyas ranuras está alojado un

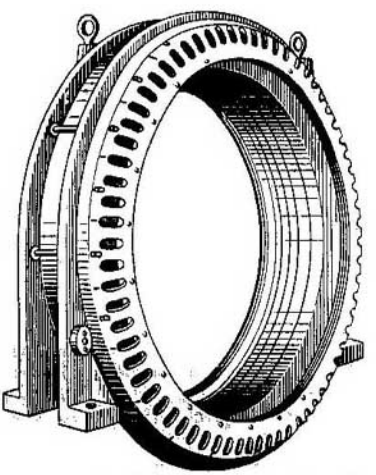


Fig. 240. Aspecto exterior del estator de un alternador sincrónico

devanado de corriente alterna, y de una carcasa de hierro fundido o soldado de chapas de acero.

En las ranuras estampadas en la superficie interior del núcleo se coloca el devanado del estator. El aislamiento del devanado se

hace con particular minuciosidad, ya que la máquina suele funcionar a tensiones altas. En calidad de aislamiento se usa micanita o cinta de micanita.

En la fig. 240 se da el aspecto exterior del estator de un alternador sincrónico.

2. Rotor. Según su construcción, los rotores de las máquinas sincrónicas se dividen en dos tipos: a) los de polos salientes (es decir, con polos claramente distinguibles) y b) los lisos (es decir, con polos apenas distinguibles).

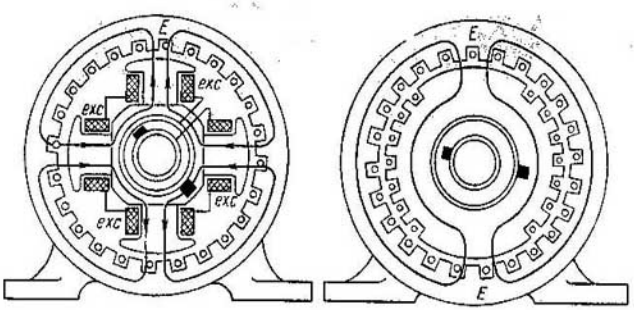


Fig. 241. Esquemas de construcción de alternadores sincrónicos con rotores de polos salientes y lisos

En la fig. 241 están representados los esquemas de alternadores sincrónicos de polos salientes y lisos.

Una y otra construcción del rotor está condicionada por consideraciones de resistencia mecánica. En los alternadores modernos, que son impulsados por motores de gran velocidad (turbina de vapor), la velocidad circunferencial del rotor puede alcanzar 100—160 m/seg (en algunos casos, 170 m/seg). Por eso los alternadores de muchas revoluciones tienen un rotor liso. La velocidad de rotación de los alternadores de gran velocidad es de 3.000 y 1.500 r.p.m.

El rotor de polos salientes es una pieza maciza forjada de acero. A la llanta del rotor se fijan los polos sobre los cuales están puestas las bobinas de excitación que se unen entre sí en serie. Los extremos del devanado inductor se unen a dos anillos fijos en el árbol del rotor. Sobre los anillos están puestas las escobillas a las que se conecta una fuente de corriente continua. En la fig. 242 se muestra el aspecto exterior del rotor de polos salientes. Como regla general, la corriente continua para excitar el rotor es proporcionada por un generador de corriente continua asentado en el mismo árbol que

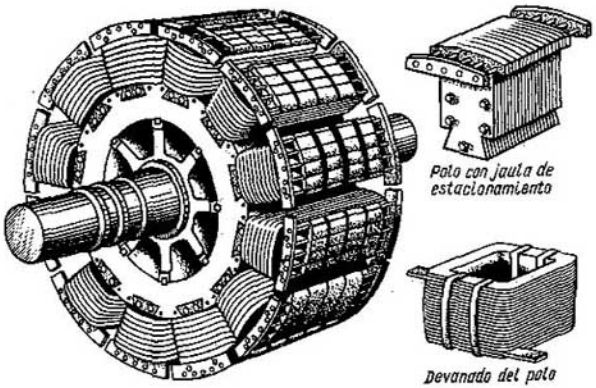


Fig. 242. Aspecto exterior de un rotor con polos salientes

el rotor y denominado e x c i t a t r i z. La potencia de la excitatriz es igual al 0,25—1% de la nominal del alternador sincrónico. Las tensiones nominales de las excitatrices son de 60 a 350 V.

En la fig. 243 se muestra el esquema de excitación de una máquina sincrónica.

Existen también alternadores sincrónicos de autoexcitación. La corriente continua para excitar el rotor se obtiene por medio de rectificadores de selenio que se conectan al devanado del estator del alternador. En el primer momento el débil campo de magnetismo remanente del rotor en rotación induce en el devanado del estator

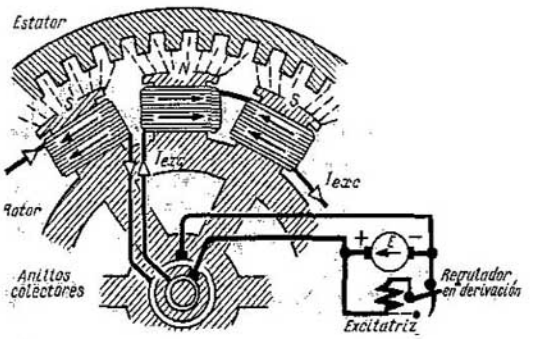


Fig. 243. Esquema de excitación de una máquina sincrónica

una f.e.m. alterna pequeña. Los rectificadores de selenio conectados a la corriente alterna dan una corriente continua que intensifica el campo del rotor y la tensión del alternador aumenta.

El rotor liso se fabrica de una sola pieza, forjada de acero y sometida a complicados tratamientos térmico y mecánico. Como ejemplo, citemos los datos de un rotor de turbogenerador de 100 mil kW de potencia para $n = 3.000$ r.p.m. construido por la fábrica «Electrosila». El diámetro del rotor $D = 0{,}99$ m, la longitud $l = 6{,}35$ m. La velocidad circunferencial del rotor es de 155 m/seg. El rotor forjado, después del tratamiento, pesa 46,5 toneladas.

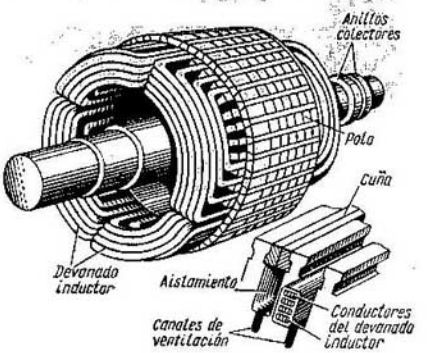


Fig. 244. Aspecto general de un rotor liso montado

En la dirección axial por la circunferencia del rotor se fresan ranuras en las cuales se aloja el devanado inductor. El devanado se fija en las ranuras mediante cuñas metálicas (de acero o de bronce). Las partes frontales del devanado son fijadas con anillos metálicos de sujeción.

En la fig. 244 se muestra el aspecto exterior de un rotor armado con polos lisos de un turbogenerador.

Durante la construcción de las máquinas eléctricas y transformadores se presta gran atención a su ventilación. Para los alternadores sincrónicos se emplea el enfriamiento por aire y por hidrógeno.

El enfriamiento por aire se efectúa por medio de ventiladores montados sobre el árbol en ambos extremos del rotor (para los alternadores de 1.500 a 50.000 kW de potencia) o dispuestos debajo de la máquina en el orificio del fundamento (para los alternadores de 100.000 kW de potencia).

Para evitar que la máquina se ensucie con polvo, las masas de aire frío que llegan para la ventilación pasan a través de filtros. En un sistema con circulación a circuito cerrado, la máquina es

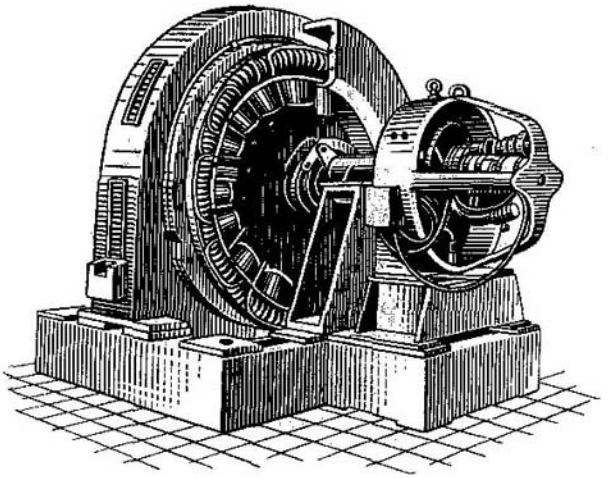


Fig. 245. Aspecto general de un alternador sincrónico con excitatriz

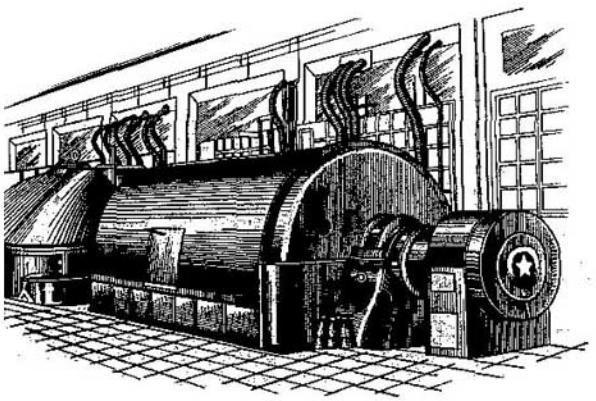


Fig. 246. Aspecto exterior de un alternador sincrónico de 50.000 kW de potencia

enfriada por el mismo volumen de aire. Al pasar a través de la máquina, el aire se calienta y llega al enfriador, después de lo cual se impele de nuevo a la máquina, y así sucesivamente. Para enfriar se usa también un sistema de canales de ventilación construidos en determinadas partes de la máquina. El método más eficaz para

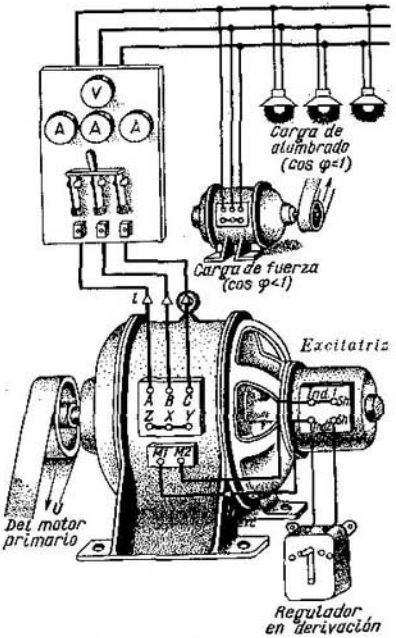


Fig. 247. Esquema de un alternador sincrónico con excitatriz

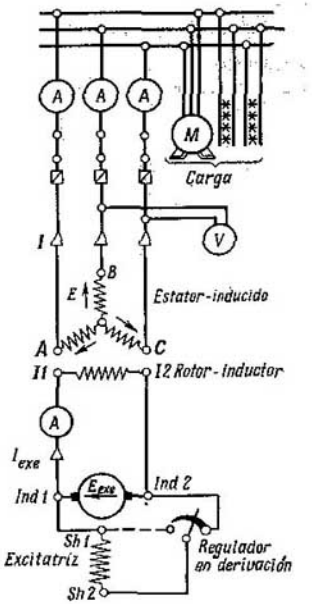


Fig. 248. Esquema eléctrico de conexiones de un alternador sincrónico con carga

enfriar la máquina es el enfriamiento por hidrógeno. El hidrógeno, que dispone de una conductividad térmica 7,4 veces mayor que la del aire, evacua mejor el calor de las partes calentadas de la máquina. Las pérdidas por rozamiento en el enfriamiento por aire son cerca del 50% de la suma total de las pérdidas en la máquina. El hidrógeno tiene un peso específico 14,5 veces menor que el aire. Por eso el rozamiento con hidrógeno es mucho menor. El hidrógeno contribuye también a conservar el aislamiento y las envolturas barnizadas de la máquina. El aspecto exterior de un alternador sincrónico de polos salientes con excitatriz se muestra en la fig. 245,

y de un alternador sincrónico de rotor liso de 50 000 kW de potencia, en la fig. 246.

Los hidrogeneradores se ponen en rotación con turbinas hidráulicas. Estas turbinas tienen generalmente un árbol vertical con poco número de revoluciones. El alternador sincrónico de baja velocidad tiene gran número de polos y, como consecuencia, dimensiones considerables. Así, por ejemplo, el hidrogenerador tipo CB $\frac{1.200}{170}$-96 de 50.000 kW de potencia, construido por la fábrica «Electrosila», tiene un peso total de 1.142 t, el diámetro de su estator es de 14 m, la altura de 8,9 m y sus polos son 96.

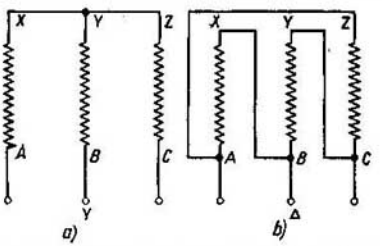


Fig. 249. Montaje de los devanados de un alternador trifásico en estrella y en triángulo

En la fig. 247 se da el esquema de un alternador sincrónico con excitatriz que abastece la carga de fuerza y de iluminación. En la fig. 248 se da el esquema eléctrico de conexiones de un alternador sincrónico con carga.

Los devanados de los estatores de alternadores sincrónicos se arrollan igual que los de motores asincrónicos.

Los seis terminales de los devanados trifásicos del alternador se montan generalmente en su tablero. Conectando tres extremos en un punto neutro común y tres comienzos de los devanados a la red exterior, obtendremos una conexión de los devanados en estrella (fig. 249,*a*). Conectando el terminal del primer devanado con el comienzo del segundo, el terminal del segundo con el comienzo del tercero, el terminal del tercero con el comienzo del primer devanado y haciendo tres derivaciones de los puntos de unión a la red exterior, obtendremos una conexión de los devanados en triángulo (fig. 249,*b*).

§ 127. Reacción del inducido del alternador sincrónico

Al cargar el alternador sincrónico, por el devanado del estator pasa una corriente que crea su propio flujo magnético. Este último actuando con el flujo del rotor forma un flujo megnético resultante

de la máquina. Semejante acción del flujo magnético del estator (aquí, del inducido) sobre el flujo de polos del rotor se denomina reacción del inducido. En la exposición que haremos a continuación no tomaremos en cuenta el flujo magnético de dispersión del estator.

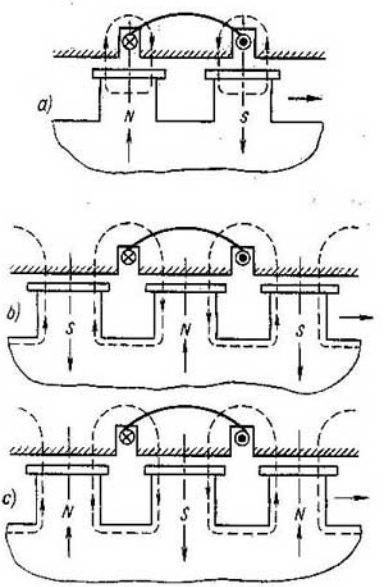


Fig. 250. Reacción del inducido de un alternador sincrónico

La reacción del inducido ejerce gran influencia sobre el funcionamiento del alternador sincrónico. Estudiemos tres casos característicos:

1. El alternador tiene una carga activa. La corriente está en fase con la f.e.m. inducida en el devanado del estator.

Analicemos el instante en que ambos lados de la bobina de un devanado de fase se encuentran sobre los centros de los polos (fig. 250,*a*). En este momento la f.e.m. de la bobina tiene magnitud máxima y, puesto que la carga del alternador es exclusivamente activa, la corriente en la bobina tendrá también magnitud máxima. El sentido de las líneas magnéticas alrededor de los conductores de la bobina del estator, se determina por la regla del sacacorchos.

En el dibujo se ve, que el campo del estator desmagnetiza el extremo de entrada y magnetiza el de salida. Este caso se llama reacción transversal del inducido.

2. El alternador tiene una carga exclusivamente inductiva y la corriente se atrasa 90° con respecto a la f.e.m. (fig. 250,*b*). El máximo de corriente surge en el momento en que los polos pasan detrás de los conductores correspondientes a una distancia igual a la mitad de la fracción polar. En el dibujo se ve, que el flujo magnético del estator está orientado hacia el flujo de los polos a lo largo de su eje. Este caso se llama reacción longitudinal desmagnetizante del inducido.

3. El alternador tiene una carga exclusivamente capacitiva. La corriente está adelantada 90° respecto a la f.e.m. (fig. 250,*c*). El máximo de corriente se obtiene en el momento en que los polos están a una distancia igual a la mitad de la fracción polar con respecto a los conductores correspondientes. En el dibujo se ve, que el flujo magnético del estator se orienta en la misma dirección que el de los polos a lo largo de su eje.

Este caso se llama reacción longitudinal magnetizante del inducido. En la fig. 250 se muestran los momentos en que las corrientes en el circuito del devanado de una fase tienen magnitud máxima. En cualquier otro momento las magnitudes de las corrientes en el devanado de la fase del estator serán menores y la reacción del inducido del devanado de una fase será correspondientemente debilitada. En realidad, la carga tiene un carácter mixto. Por eso el flujo magnético de la reacción del inducido tendrá tanto componente transversal como longitudinal.

De este modo, la reacción del inducido del alternador sincrónico depende del carácter de la carga, es decir, del desfasamiento entre la f.e.m. inducida en el estator y su corriente.

§ 128. Características de los alternadores sincrónicos

El funcionamiento de una máquina en diferentes regímenes y las propiedades de la misma se determinan por sus características. Para obtener las características de un alternador sincrónico se monta el esquema representado en la fig. 251.

Estudiemos la característica de la marcha en vacío de un alternador sincrónico. Esta es una función entre la f.e.m. E_0, inducida en el estator, y la corriente de excitación I_{exc}; el circuito exterior de la máquina es abierto:

$$E_0 = f(I_{exc}) \text{ siendo } n = n_c \text{ o } I = 0.$$

El alternador se pone en rotación con velocidad sincrónica que corresponde a la frecuencia nominal del mismo. Mediante un reóstato se aumenta la corriente de excitación, anotando las indicaciones del amperímetro del circuito de excitación. Por las indicaciones

del voltímetro, conectado a los bornes del devanado del estator, se determina la magnitud de la f.e.m. E_0 inducida.

La característica de la marcha en vacío de un alternador sincrónico está expuesta en la fig. 252. La parte rectilínea de la característica muestra la proporcionalidad entre la f.e.m. inducida y la

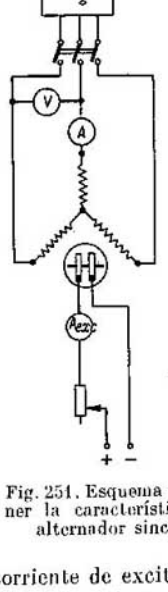


Fig. 251. Esquema para obtener la característica de un alternador sincrónico

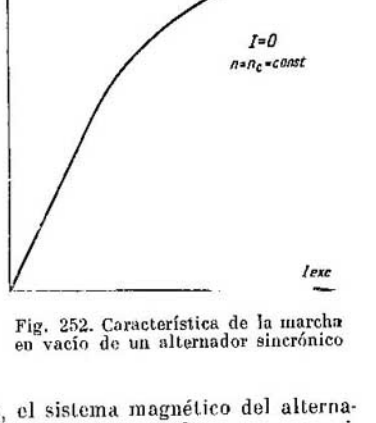


Fig. 252. Característica de la marcha en vacío de un alternador sincrónico

corriente de excitación. Después, el sistema magnético del alternador se va saturando, la curva se dobla, es decir, al aumentar considerablemente la corriente de excitación, la f.e.m. inducida crece lentamente. Generalmente el funcionamiento normal de la máquina tiene lugar después de hacerse pronunciada la curva de la característica de la marcha en vacío.

La dependencia de la tensión en los bornes del alternador U con respecto a la corriente de carga I, siendo constantes las magnitudes de la corriente de excitación I_{exc}, del factor de potencia cos φ y de la velocidad de rotación n, se da por la característica exterior:

$$U = f(I)$$

siendo $I_{exc} = const$, $\cos \varphi = const$, $n = n_c = const$.

Según las indicaciones del amperímetro y del voltímetro conectados en el circuito del devanado del estator se traza la caracterís-

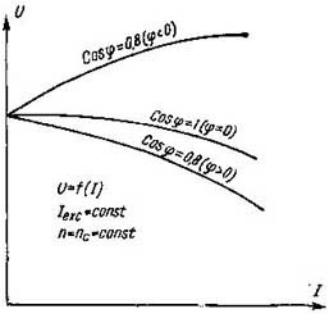


Fig. 253. Características exteriores de un alternador sincrónico

tica. En la fig. 253 se dan las características exteriores del alternador para distintas clases de carga.

Recordemos, que se considera como positivo el ángulo φ en un circuito, cuando la corriente está retrasada en fase respecto a la tensión, y negativo cuando la corriente adelanta en fase a la tensión.

El cambio de la tensión con carga ocurre debido a la reacción del inducido y a la caída de tensión en el devanado del mismo (estator).

Cuando la carga es inductiva, la corriente reactiva desmagnetiza la máquina y, al aumentar la corriente de carga, la tensión disminuye.

Cuando la carga es capacitiva, la tensión del alternador, al aumentar la carga de la corriente, crece, debido a la acción de la reacción longitudinal magnetizante del inducido.

La característica de regulación es la dada por la dependencia de la corriente de excitación I_{exc} con respecto a la corriente de car-

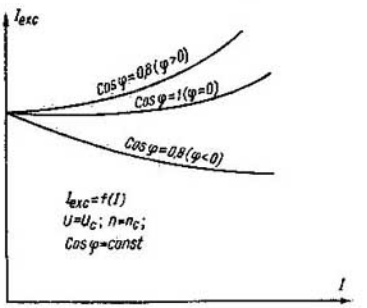


Fig. 254. Características de regulación de un alternador sincrónico

ga I, siendo constantes las magnitudes de la tensión en los bornes del alternador U, la velocidad de rotación n y el factor de potencia $\cos \varphi$:

$$I_{exc} = f(I)$$

siendo $U = U_c$, $n = n_c$, y $\cos \varphi = \text{const}$.

Las características de regulación representadas en la fig. 254 muestran cómo al variar la carga es necesario cambiar la corriente de excitación para compensar la caída de tensión en el devanado del inducido y la acción de la reacción del inducido.

§ 129. Funcionamiento en paralelo de alternadores sincrónicos

Para el trabajo del alternador sincrónico que se conecta en paralelo, es necesario cumplir las siguientes condiciones:

1. La tensión que se conecta a la máquina debe ser igual a la de la red o de la máquina en funcionamiento.
2. La frecuencia del alternador que se va a conectar debe ser igual a la de la red.
3. Las tensiones de todas las fases de la máquina que se conecta deben estar opuestas en fase a las de las tensiones de las correspondientes fases de la red o de la máquina en funcionamiento.
4. Para conectar en paralelo un alternador sincrónico trifásico es necesario asegurar igual sucesión de las fases de la máquina que se conecta y de la red.

La preparación de la conexión del alternador sincrónico en paralelo se efectúa del modo siguiente. Se pone en rotación el motor primario y se regula su velocidad de rotación para que sea aproximadamente igual a la nominal. Después se excita el alternador, y, observando las indicaciones del voltímetro conectado a los bornes del estator, se regula la tensión de la máquina mediante el reóstato del circuito de excitación hasta que ésta sea igual a la tensión de la red. Influyendo sobre el regulador del motor primario y observando las indicaciones del frecuencímetro, se establece con mayor precisión la velocidad de la máquina, de modo que la frecuencia del alternador sea igual a la de la red. De este modo se verán cumplidas la primera y la segunda condiciones de conexión en paralelo.

Para cumplir la tercera condición, así como para establecer plena igualdad de frecuencias, se usan las lámparas de fase. Las lámparas de fase para máquinas de corriente monofásicas se conectan según dos esquemas: a extinción (fig. 255, *a*) y a ignición (fig. 255,*b*). Si las fases de la red y de la máquina coinciden, las lámparas conectadas según el esquema *a* se apagarán, y según el esquema *b*, arderán a plena incandescencia. En este momento hay que conectar el interruptor de cuchilla del alternador.

Para las máquinas de corriente trifásica las lámparas de fase se conectan también según dos esquemas: a extinción (fig. 256, *a*)

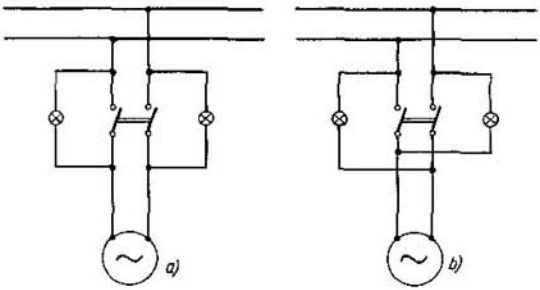


Fig. 255. Conexión de las lámparas de fase:
a — a extinción, *b* — a ignición

y a la rotación de la luz (fig. 256, *b*). Las lámparas conectadas según el esquema *a*, en caso de sucesión igual de las fases de la red y de la máquina, primeramente centellearán rápida y simultáneamente, después el centelleo se hace más lento y, cuando las lámparas se apagan, debe conectarse el interruptor del alternador.

Para determinar más exactamente el momento de conexión del interruptor se intercala a menudo el así llamado voltímetro cero con escala bilateral.

Si la secuencia de las fases de la red y de la máquina es la misma, las lámparas conectadas, según el esquema *b*, centellearán por turno, y si las disponemos en círculo, obtendremos la impresión de una luz que gira. La velocidad de rotación de la luz depende de la diferencia de frecuencias. El generador hay que conectarlo en el momento en que las lámparas conectadas en cruz ardan con incan-

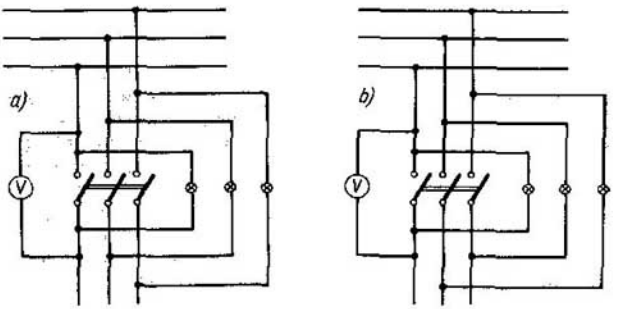


Fig. 256. Conexión de las lámparas de fase de un alternador trifásico:
a — a extinción, *b* — a rotación de luz

descencia máxima; la tercera lámpara se apaga. En otras palabras, es más cómodo conectar el interruptor en el momento en que se cambia la dirección de rotación de la luz.

Si la sucesión de las fases es distinta, las lámparas conectadas según el esquema *a* darán la rotación de la luz, y las conectadas según el esquema *b* se encenderán y apagarán simultáneamente. Para cambiar el orden de sucesión de fases de la máquina hay que cambiar de lugar dos de los conductores que van al interruptor.

La conexión de las lámparas de fase de los alternadores de alto voltaje se realiza a través de transformadores de medición de tensión (capítulo XIV, § 171).

De este modo, por medio de las lámparas de fase podemos determinar las fases opuestas, establecer la igualdad de frecuencias y el orden de sucesión de las fases de la red y de la máquina que se conecta. Se puede también determinar la sucesión de las fases de la máquina empleando un aparato especial, indicador de orden de fases, que es un pequeño motor asincrónico.

La dirección de rotación del disco del indicador de orden de fases muestra el orden de sucesión de las mismas.

Cuando el alternador sincrónico funciona en paralelo con la red, su velocidad de rotación queda constante y es igual y la sincrónica.

El proceso de preparación del alternador para conectarlo en paralelo se denomina s i n c r o n i z a c i ó n.

En los últimos años se ha difundido el método de conexión de alternadores sincrónicos para funcionamiento en paralelo denominado sincronización automática (autosincronización). Lo esencial de este procedimiento consiste en lo siguiente. Mediante un motor primario se pone en rotación el alternador y se establece una velocidad próxima a la sincrónica. El devanado inductor se cierra con una resistencia suplementaria que es de 3 a 5 veces mayor que la magnitud de la resistencia del devanado. Se conecta el interruptor de cuchilla que une el generador con la red. Se conmuta el devanado inductor de la resistencia suplementaria a la fuente de corriente continua que lo alimenta. Después, el generador por sí mismo entra en sincronismo.

Realicemos el experimento siguiente. Intercalemos en el circuito del estator de un alternador sincrónico un amperímetro, un vatímetro y un fasímetro. Conectemos un amperímetro al circuito de excitación del alternador. Conectemos el alternador para que funcione en paralelo y démosle cierta carga activa. Aumentando la corriente de excitación en el circuito de excitación, mediante un reóstato, observemos las indicaciones de los aparatos. Resulta, que la potencia activa que el alternador entrega a la red queda prácticamente constante y durante el experimento las indicaciones del vatímetro serán invariables. Si la carga activa es constante, a cierta magnitud de la corriente de excitación, la corriente en el circuito del estator resulta mínima. Esto corresponde a la corriente puramente activa

de carga del alternador ($\cos \varphi = 1$). Si conectamos al alternador distintas cargas activas, a cada magnitud de carga activa le corresponderá una corriente de excitación determinada para la cual $\cos \varphi = 1$. Al sobrepasar la corriente de excitación esta magnitud, surge una corriente reactiva retardada. El fasímetro indicará la disminución del $\cos \varphi$ y el alternador entregará a la red una potencia reactiva retardada. Al contrario, si disminuimos la corriente

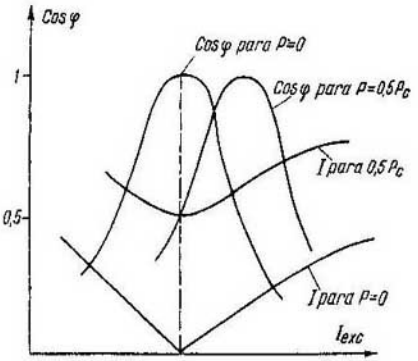


Fig. 257. Característica en U de un alternador sincrónico

de excitación y la hacemos menor que la magnitud indicada, aparecerá una corriente reactiva avanzada. El fasímetro mostrará de nuevo la disminución del $\cos \varphi$ y el alternador consumirá de la red una potencia reactiva retardada para crear su campo giratorio.

La dependencia entre la corriente del estator (del inducido) del alternador sincrónico y la de excitación, siendo constante la potencia activa, se llama característica en U de la máquina; la denominación se debe a la configuración de la curva que recuerda la letra U. En la fig. 257 se muestra la característica en U de un generador sincrónico.

§ 130. Estructura y funcionamiento de un motor sincrónico

El alternador sincrónico puede funcionar en calidad de motor eléctrico. Tal motor se llamará sincrónico. Los motores sincrónicos trifásicos han adquirido la máxima difusión. El devanado de su estator se alimenta con corriente alterna trifásica y el del rotor se conecta a una fuente de corriente continua.

Al alimentar el devanado del estator de un motor sincrónico con corriente alterna trifásica surge un campo magnético giratorio.

La velocidad de rotación del campo depende de la frecuencia de la corriente alterna y del número de polos del estator. Si hay dos polos y la frecuencia es de 50 Hz, el campo dará 3.000 r.p.m., si hay cuatro polos, 1.500, si hay seis, 1.000, etc.

Sin embargo, si después de conectar el estator, conectamos una corriente continua al devanado del rotor, éste no girará. Por sí mismo no puede ponerse en movimiento. Esto se explica por el hecho de que el campo magnético del estator, girando con gran velocidad respecto al rotor inmóvil, no puede comunicarle momentáneamente una velocidad sincrónica y hacerlo girar. Puesto que el rotor dispone de una masa considerable y de gran inercia, no es capaz de ponerse en movimiento y desarrollar la velocidad necesaria. Por eso, para poner en marcha un motor sincrónico hay que emplear dispositivos especiales.

El motor sincrónico tiene una apreciable particularidad, que es la siguiente. Si las corrientes de excitación son pequeñas y el rotor consume una corriente reactiva de la red y funciona, como se dice, con un cos φ retardado, aumentando la corriente de excitación del rotor, es posible lograr que el devanado del estator no consume absolutamente corriente reactiva y en este caso el cos φ será igual a la unidad.

Al seguir aumentando la corriente de excitación del rotor, el estator comienza a entregar la corriente reactiva a la red y el motor sincrónico, sin dejar de llevar la carga mecánica, se convierte al mismo tiempo en un generador de corriente reactiva o de potencia reactiva. En este caso el motor se asemeja a un condensador y funcionará con el cos φ adelantado.

Para el trabajo de los consumidores inductivos de corriente alterna (motores asincrónicos, transformadores) se necesita la potencia reactiva. Los consumidores toman generalmente esta potencia reactiva (o corriente reactiva) por medio de un conductor directo desde la central eléctrica. Si junto a tales consumidores trabaja un motor sincrónico sobreexcitado, se puede recibir potencia reactiva de este motor y no tomarla de la central eléctrica. Esto llevará al mejoramiento del cos φ de la instalación y a la disminución de la corriente en los cables que van de la central.

El motor sincrónico destinado para mejorar el cos φ de la instalación se denomina c o m p e n s a d o r d e f a s e s i n c r ó n i c o.

En algunos aparatos físicos, cine sonoro, tocadiscos, instalaciones telemecánicas y otros dispositivos donde se necesita una velocidad de rotación constante, se utilizan motores sincrónicos reactivos de baja potencia (de varias decenas o centenas de vatios) (fig. 258).

En el estator de tales motores se coloca un devanado que se alimenta con corriente alterna (monofásica o trifásica). El rotor de los motores reactivos es de polos salientes, pero a diferencia de los

motores sincrónicos corrientes no tiene devanado inductor. Las líneas magnéticas del campo magnético giratorio del estator tienden a pasar por el camino de menor reluctancia. Por eso el rotor girará de modo que los ejes de sus polos coincidan con la dirección de las líneas magnéticas del campo del estator. Por consiguiente, el rotor girará sincrónicamente con el campo del estator.

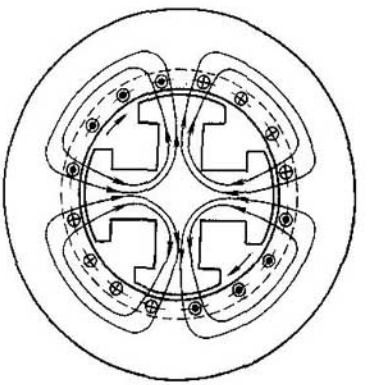


Fig. 258. Esquema de un motor sincrónico reactivo

Para poner en marcha los motores reactivos se emplea el método asincrónico. Los motores reactivos de potencia muy pequeña arrancan simplemente a mano.

En comparación con otros motores de corriente alterna los reactivos tienen un cos φ y rendimiento bajos.

§ 131. Propiedades de los electromotores sincrónicos y esfera de su empleo

Las ventajas de los motores eléctricos sincrónicos son: 1) conservan constante el número de revoluciones para diferentes cargas; 2) el cos φ es alto; 3) posibilidad de compensar el cos φ. Pequeña dependencia de la potencia electromagnética (y del par electromagnético) con respecto a la tensión (están en función de la primera potencia de la tensión mientras que en los motores asincrónicos, por ejemplo, dependen del cuadrado de la tensión).

Los inconvenientes que presentan los electromotores sincrónicos son: 1) selección limitada de la velocidad de rotación e imposibilidad de su regulación; 2) perturbación del sincronismo en caso de sobrecargas; 3) predisposición a oscilaciones (señalemos que en los motores asincrónicos no existe este defecto).

En vista de las particularidades mencionadas, los electromotores sincrónicos han encontrado su máxima aplicación en instalaciones de acción ininterrumpida y como accionamientos de máquinas de velocidad constante (bombas de émbolo, bombas centrífugas, ventiladores centrífugos, compresores, grupos motor-generador, árboles de transmisión, etc.).

Preguntas de control

1. ¿Qué tipos de alternadores existen y cuál es su estructura?
2. ¿Cómo se puede variar la tensión de un alternador?
3. ¿Cómo se manifiesta la reacción del inducido del alternador sincrónico?
4. ¿Cómo se conecta un alternador sincrónico para el trabajo en paralelo?
5. ¿Cuál es la estructura de un motor sincrónico y cómo funciona?
6. ¿Cuáles son las ventajas e inconvenientes de los motores sincrónicos y dónde se aplican?