XII

MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

§ 132. Estructura del generador de corriente continua

El generador de corriente continua es una máquina eléctrica que transforma la energía mecánica de un motor primario, que la hace girar, en energía eléctrica de corriente continua que la máquina entrega a los consumidores. La fig. 259 muestra el aspecto exterior de un generador de corriente continua. En la fig. 260 se dan los cortes longitudinal y transversal de una máquina de corriente continua. El trabajo del generador de corriente continua se funda en

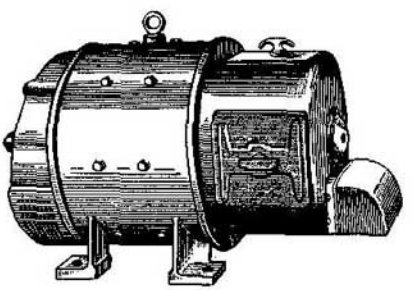


Fig. 259. Aspecto exterior de un generador de corriente continua

el principio de inducción electromagnética. Por eso las partes principales del generador son: inducido con devanado y electroimanes que crean un campo magnético.

El inducido es de forma cilíndrica y se arma de chapas estampadas de acero electrotécnico de 0,5 mm de espesor. Las chapas están aisladas una de otra por una capa de barniz o por papel fino. Las cavidades estampadas por la circunferencia de cada chapa forman ranuras, durante el montaje del inducido y la compresión de las chapas, en las cuales se alojan conductores aislados del devanado del inducido.

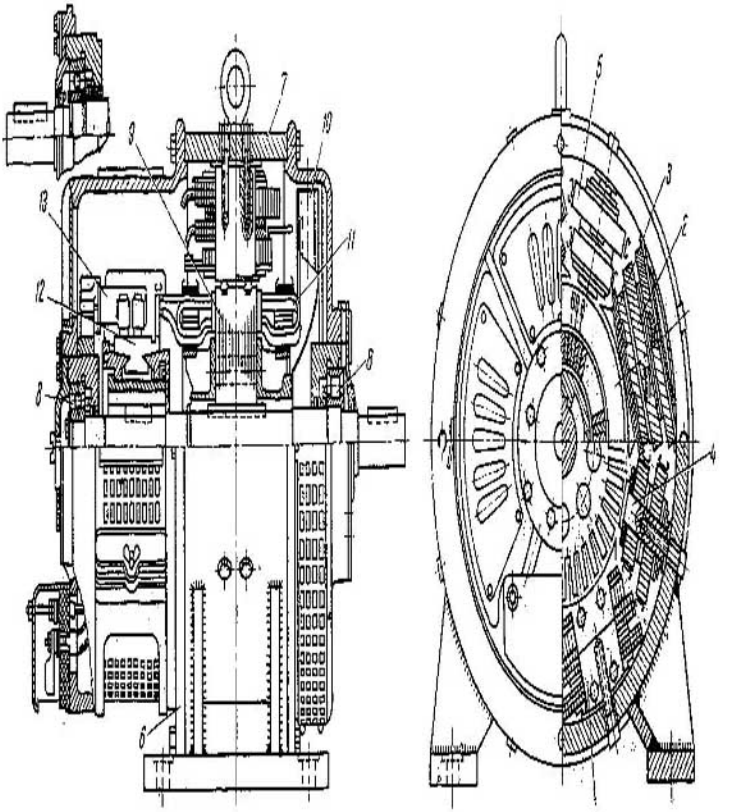


Fig. 269. Cortes longitudinal y transversal de una máquina de corriente continua:

1 — núcleo del polo principal, *2* — bobina del polo principal, *3* — terminal polar, *4* — núcleo del polo complementario, *5* — bobina del polo complementario, *6* — carcasa, *7* — culata, *8* — cojinete de caja, *9* — núcleo del inducido, *10* — ventilador, *11* — devanado del inducido, *12* — colector, *13* — bulón de escobilla

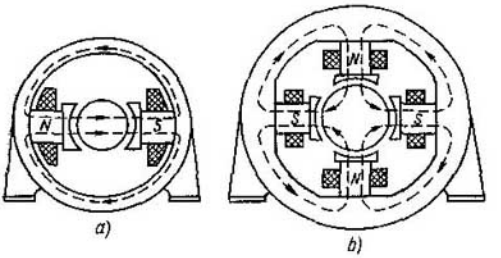


Fig. 261. Carcasas de las máquinas de corriente continua: *a* — con dos polos, *b* — con cuatro polos

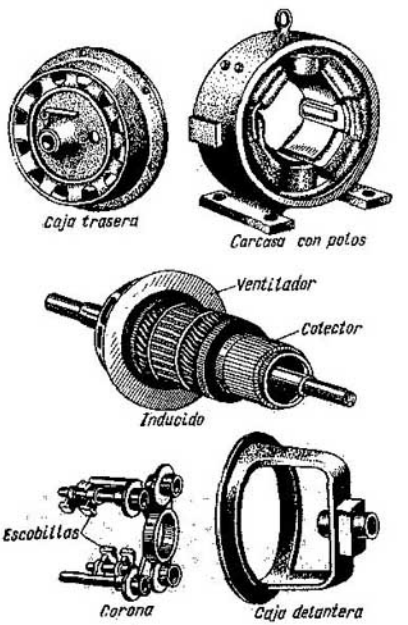


Fig. 262. Máquina de corriente continua desarmada

Sobre el árbol del inducido se fija el colector compuesto de delgas de cobre soldadas a determinados puntos del devanado del inducido. Las delgas del colector están aisladas una de otra con micanita. El colector sirve para rectificar la corriente y derivarla a la red exterior mediante escobillas inmóviles (véase a continuación).

Los electroimanes del generador de corriente continua están compuestos de núcleos polares de acero, atornillados a la carcasa.

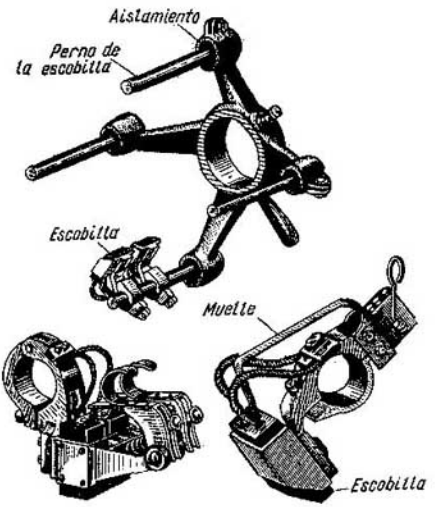


Fig. 263. Corona y portaescobillas

La carcasa del generador es de acero fundido. En las máquinas de potencia muy baja la carcasa está fundida junto con los núcleos polares. En los demás casos, los núcleos polares se arman de chapas aisladas de acero electrotécnico. Sobre los núcleos se instalan bobinas de alambre de cobre. El alambre está aislado. La corriente continua que pasa a través del devanado inductor (de los electroimanes) crea el flujo magnético de los polos. Para una mejor distribución del flujo magnético en el entrehierro, a la culata se le fijan polos con terminales armados de chapas de acero. En la gran mayoría de los casos, el polo es estampado junto con el terminal polar. En la fig. 261 se muestra esquemáticamente la estructura de una carcasa con dos y cuatro polos.

En la fig. 262 se muestran las partes componentes de una máquina de corriente continua.

El circuito exterior se une con el de inducido de la máquina de corriente continua por medio de escobillas instaladas en los portaescobillas y montadas sobre pernos de la corona portaescobillas. Los pernos se aíslan de la corona por medio de casquillos y arandelas aislantes. En la fig. 263 se muestran la corona y los portaescobillas con las escobillas.

Al girar el inducido, su devanado cruza las líneas magnéticas de los polos. De acuerdo con la ley de inducción electromagnética, en los conductores del devanado del inducido se inducirá una f.e.m. cuya magnitud puede ser calculada por la fórmula

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

donde B = inducción magnética de los polos, expresada en $\frac{V \cdot seg}{m^2}$;

l = longitud activa de los conductores del inducido, en m;

v = velocidad lineal de los conductores del inducido, en m/seg;

α = ángulo entre la dirección de la velocidad de movimiento del conductor y la del vector de inducción magnética.

§ 133. Empleo y estructura del colector en los generadores de corriente continua

Al girar el inducido en el campo magnético de los polos, en los conductores de su devanado se induce una f.e.m. variable en magnitud y dirección. Si soldamos los extremos de una espira a dos anillos de cobre y apoyamos sobre éstos escobillas conectadas a la red exterior, al girar la espira en el campo magnético, como se muestra en la fig. 264, en el circuito cerrado surgirá una corriente eléctrica alterna. En este fenómeno se basa el funcionamiento de los generadores de corriente alterna (alternadores).

Pero si conectamos los extremos de la espira a dos mitades de anillos de cobre, aislados uno del otro, denominados delgas del colector, y ponemos sobre éstas escobillas, al girar la espira en el campo magnético, como se muestra en la fig. 265, en ésta se inducirá, como antes, una f.e.m. alterna. Pero en el circuito exterior pasará una corriente variable en magnitud y de dirección constante (corriente pulsatoria). Para demostrar esto, veamos las partes de la fig. 266, en la cual se muestra un inducido de forma anular con una espira. El comienzo de la espira C está soldado a la delga a del colector, el extremo final de la espira F, a la delga b. Con las delgas del colector hacen contacto dos escobillas inmóviles, conectadas a la red exterior. Veamos tres posiciones características de la espira en el espacio entre los polos. En la posición a (fig. 266) la espira se encuentra en la zona de acción del polo norte. Teniendo en cuenta la dirección de rotación del inducido, determinamos la dirección

de la f.e.m. en la espira, de acuerdo con la «regla de la mano derecha». Hay que tener en cuenta que la f.e.m. se induce sólo en la parte de la espira que está sobre el inducido. Por eso, debido

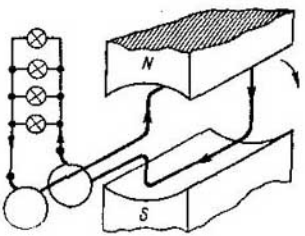


Fig. 264. Obtención y empleo de la corriente alterna

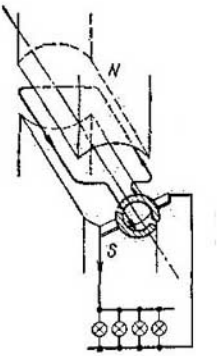


Fig. 265. Aplicación del colector

a que el devanado se aprovecha mal, el inducido anular actualmente no se utiliza. En la posición dada la corriente se dirige desde el comienzo de la espira hacia su fin. La corriente pasará al circuito exterior a través de la escobilla derecha. Por eso se puede llamar positiva esta escobilla. Después de superar la resistencia del circuito exterior,

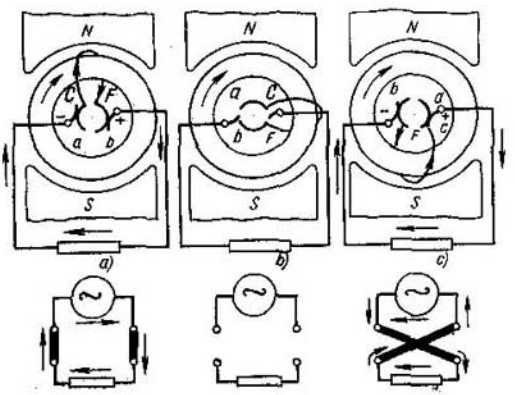


Fig. 266. Empleo del colector en los generadores de corriente continua

la corriente llega a la escobilla izquierda del generador, la que llamamos negativa.

En la posición *b* de la fig. 266 la espira se encuentra en la línea neutra. La línea neutra o neutral geométrica es la línea que pasa a través del centro del inducido y que es perpendicular al eje de los polos. La parte activa de la espira se desliza en esta posición a lo largo de las líneas magnéticas, sin cruzarlas. Por eso, la f.e.m. no se induce en la espira, y la corriente en el circuito es igual a cero. La anchura de la escobilla es mayor que la de la división del colector formada por la delga y el intersticio aislante, y la espira, encontrándose en la línea neutra, en este momento se pone en cortocircuito por las escobillas.

En la posición *c*, la espira está en la zona de acción del polo sur. Determinando la dirección de la f.e.m. inducida en la espira, establecemos que la corriente se dirige desde el final de la espira hacia su comienzo. Si la delga *a* del colector tocara como antes la escobilla izquierda, y la delga *b*, la escobilla derecha, el cambio de la dirección de la corriente en la espira provocaría una modificación de la corriente en el circuito exterior. Pero ahora eso no ocurrirá, ya que el cambio de dirección de la corriente en la espira, después de pasar ésta la línea neutra, coincide con el momento en que a la escobilla derecha se le ha acercado la delga *a* y a la escobilla izquierda, la delga *b*.

Al comparar la primera y tercera posición es fácil convencerse de que en ambos casos la corriente de la espira viene a la red exterior de la escobilla positiva derecha y vuelve de la red a la escobilla negativa izquierda. En la red exterior la dirección de la corriente no cambia. Puesto que la espira ocupa diferentes posiciones en el campo magnético, la f.e.m. que se induce en la espira, y junto con ésta la corriente en la red exterior, variará en magnitud.

En la fig. 267 está representado el carácter de variación de la corriente en el circuito exterior. Tal corriente de dirección constante y de magnitud variable se denomina pulsatoria. Para aumentar la tensión en los bornes de la máquina, sobre el inducido se arrollan varias espiras (bobinas) de gran número de vueltas de alambre aislado. Si colocamos en el inducido dos bobinas, como se muestra en la fig. 268, *a*, obtendremos una conexión de bobinas en paralelo y la tensión del generador será igual a la que crea una bobina. La corriente de la red será igual al doble de la magnitud de la corriente que pasa por cada bobina. Pongamos en el inducido cuatro bobinas desfasadas 90° una respecto a otra y conectémoslas en serie (fig. 268, *b*). Aumentemos también el número de delgas del colector hasta cuatro. La dirección de la f.e.m. inducida en las bobinas la determinamos según la regla de la mano derecha.

En la fig. 269 se muestran las curvas de la f.e.m. de las bobinas *1* y *2*. Puesto que las bobinas están desfasadas 90° en el espacio, las curvas de las f.e.m. tienen también un desfasamiento de 90°.

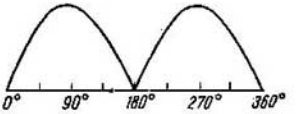


Fig. 267. Corriente pulsatoria

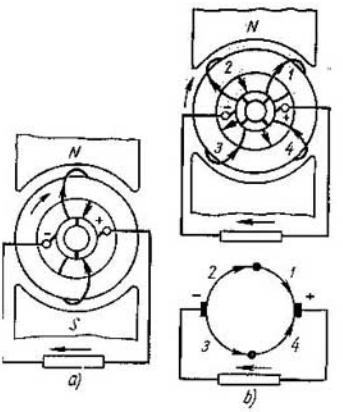


Fig. 268. Devanado del inducido:
a — un par de bobinas en el inducido, *b* — dos pares de bobinas en el inducido

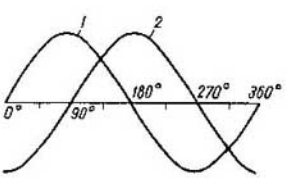


Fig. 269. Curvas de las f. e. m. de dos bobinas vecinas en el inducido dispuestas del modo indicado en la fig. 268,*b*

Las curvas de la f.e.m. en las bobinas *3* y *4* son del mismo carácter que en las bobinas *1* y *2*, diferenciándose sólo en que las f.e.m. de las bobinas *1* y *3*, por una parte, y de las bobinas *2* y *4*, por otra, son iguales en magnitud, pero opuestas en dirección. Por eso, para examinar la cuestión nos limitaremos al análisis de las curvas de las f.e.m. de las bobinas *1* y *2*. Puesto que las bobinas están conectadas entre sí en serie, la magnitud instantánea de la f. e.m. e_{tot}, que crean las dos bobinas, es igual a la suma de las magnitudes instantáneas de la f. e. m. de cada bobina. En la fig. 270 se muestra

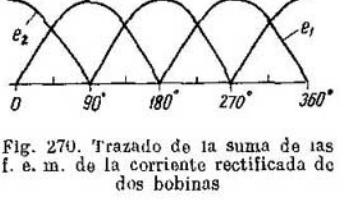


Fig. 270. Trazado de la suma de las f. e. m. de la corriente rectificada de dos bobinas

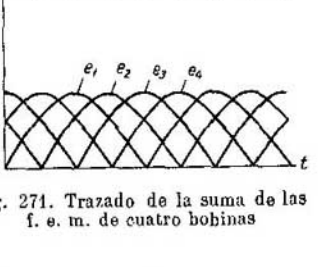


Fig. 271. Trazado de la suma de las f. e. m. de cuatro bobinas

la adición de las magnitudes instantáneas de la f.e.m. de ambas bobinas. La curva de la suma de las f.e.m. tiene una pulsación menor que las curvas de la f.e.m. de cada una de las bobinas. La suma de las f.e.m. de las bobinas que se encuentran bajo otro polo tiene la misma magnitud, pero es contraria en dirección respecto a la suma de las f.e.m. de las bobinas superiores. Las dos f.e.m. están conectadas en paralelo en relación con las escobillas del generador.

Ocho bobinas alojadas en el inducido, al sumar sus f.e.m. instantáneas darán, como se muestra en la fig. 271, la suma de f.e.m. e_{tot}, cuya pulsación será aún menor que en el caso anterior. De este modo, disponiendo en el inducido gran número de conductores y aumentando correspondientemente el número de delgas del colector se puede obtener del generador una f. e. m., cuyas pulsaciones lleguen a ser tan insignificantes, que la corriente que se entrega a la red se puede considerar prácticamente continua. Así, por ejemplo, con 16 bobinas en el inducido, las oscilaciones de la f.e.m. serán menos del 1%. En las máquinas modernas el número de bobinas en el inducido puede alcanzar más de cien.

Terminando el estudio de la acción del colector llegamos a la conclusión de que en los generadores de corriente continua el colector sirve para transformar la f.e.m. alterna que se induce en el devanado del inducido, en la f.e.m. continua en las escobillas del generador. Cabe señalar, que si le acoplamos al inducido del gene-

rador tanto un colector, camo anillos colectores, el generador puede producir, tanto tensión continua, como alterna.

El colector mostrado en la fig. 272 está compuesto de delgas de cobre estirado en frío. Entre las delgas del colector se colocan hojas de micanita (mica) de 0,5 a 1 mm de espesor. Las delgas del colector tienen un saliente que se asemeja a una cola de milano. Por el lado del inducido, sobre el árbol, se pone un manguito aislante que entra

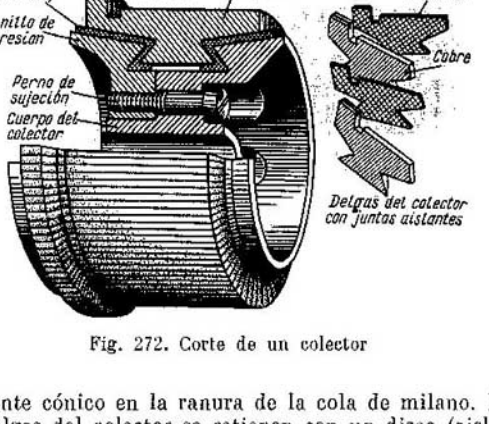


Fig. 272. Corte de un colector

con su saliente cónico en la ranura de la cola de milano. Por otra parte las delgas del colector se retienen con un disco (aislante) de presión, cuyos salientes también entran en las muescas de la cola de milano. Para que las delgas del colector no se desprendan, el manguito y el disco de presión se ajustan con pernos.

Para soldar (mediante estaño) los conductores del devanado del inducido a las delgas del colector se utilizan placas especiales de cobre que se llaman u n i o n e s e n e l c o l e c t o r.

§ 134. Devanado del inducido

Los conductores del inducido conectados según un esquema determinado forman el devanado del inducido. Las máquinas modernas de corriente continua tienen inducidos tipo tambor con ranuras dispuestas en circunferencia, en los cuales se aloja el devanado. Las ranuras pueden ser de forma abierta, semicerrada y cerrada, pero se emplean casi exclusivamente las dos primeras formas. Las ranuras de dicha forma permiten preparar el devanado del inducido separadamente sobre hormas metálicas o de madera, después de lo cual las partes del devanado aisladas con cinta de tejido de algodón o tela barnizada y dobladas de un modo determinado se alojan

en las ranuras. Para aumentar la rigidez dieléctrica, el aislamiento del devanado se impregna con barniz aislante. Semejante preparación reduce el tiempo de montaje de la máquina y hace más barato el devanado. Antes de colocar el devanado en las ranuras del inducido se inserta un aislamiento formado de cajas en forma de *U* hechas de fibro-cuero o de prespán (cartón electrotécnico). Después de colocar el devanado, en las ranuras se clavan cuñas de madera o de fibra vulcanizada. Luego, sobre las partes frontales del devanado se ponen bandajes de alambre de acero estañado que posteriormente se sueldan.

Alojemos en el inducido 8 conductores y enumerémoslos (fig. 273, *a*). Aplicando la regla de la mano derecha y teniendo en

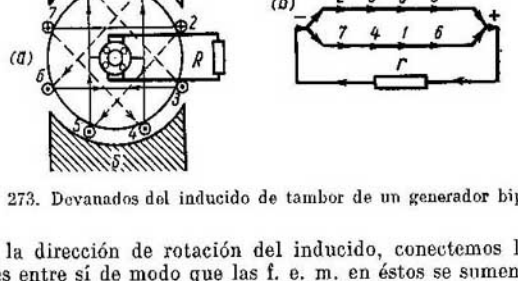


Fig. 273. Devanados del inducido de tambor de un generador bipolar

cuenta la dirección de rotación del inducido, conectemos los conductores entre sí de modo que las f. e. m. en éstos se sumen. Si los conductores están conectados en serie, la magnitud de la f. e. m. será máxima cuando el conductor que está debajo del centro de un polo, se conecta con el conductor que está debajo del centro de otro polo, por ejemplo, el conductor *8*, lo conectamos con el conductor *4*, el conductor *5*, con el conductor *1*, etc. Dos conductores conectados en serie forman una espira o una bobina. Por consiguiente, los ocho conductores del inducido formarán cuatro bobinas. Por eso el colector debe tener cuatro delgas. La anchura de la espira es igual en este caso a la fracción polar o al paso polar. Pero la necesidad de unir un conductor con otro que también está debajo del centro de otro polo, y, además, la necesidad de incluir todos los conductores en el devanado, obligan a hacer la anchura de la espira menor que una fracción polar.

En nuestro ejemplo, el conductor *1* está conectado por la parte posterior del inducido con el conductor *6*. Dicha conexión que no se ve por el lado del colector, se muestra con una línea punteada. El conductor *6* se conecta en la parte anterior con el conductor *3* (se muestra con una línea continua). Después se unen los conductores: *3* con *8*, *8* con *5*, *5* con *2*, *2* con *7*, *7* con *4*, *4* con *1*. Las conexiones

de los conductores del inducido se pueden representar también del modo siguiente: *1 — 6 — 3 — 8 — 5 — 2 — 7 — 4 — 1**.

Por consiguiente, todos los conductores quedan unidos y el devanado cerrado. Conectanto las uniones delanteras (laterales) de los conductores a las correspondientes delgas del colector, y, determinando la dirección de la corriente en las uniones laterales, vemos que las corrientes de los conductores *3* y *6* van a la delga *2* del colector. De la delga *4* del colector la corriente se bifurca a los conductores *2* y *7* del inducido. Apretando contra cada una de las delgas *2* y *4* del colector una escobilla y conectándolas con la red exterior, daremos a la corriente la posibilidad de salir de la delga *2* del colector a la red. Después de pasar por las resistencias de la red exterior, la corriente regresa a la escobilla que está en contacto con la delga *4* del colector. Luego la corriente se distribuye por los conductores del devanado del inducido. La escobilla que está en contacto con la delga *2* del colector será positiva, y la que roza la delga *4*, negativa. Comparando los devanados de los inducidos de anillo y de tambor, se puede observar que en el inducido de anillo las escobillas se encuentran en la neutral geométrica (línea neutra), mientras que en el de tambor las escobillas están bajo los centros de los polos.

En la fig. 273, *b* se indica el recorrido de la corriente por dos ramas paralelas formadas por los conductores del devanado para la posición del inducido representada en la fig. 273, *a*. Las f. e. m. inducidas en cada rama con iguales entre sí y están dirigidas en un sentido. Al girar el inducido, diferentes conductores forman parte de una u otra rama paralela.

Estudiemos el devanado del inducido de un generador tetrapolar de corriente continua. Coloquemos en el inducido 16 conductores (fig. 274, *a*) lo que formará ocho espiras o bobinas. El colector constará de ocho delgas de colector. Aplicando la regla de la mano derecha, teniendo en cuenta la dirección de rotación del inducido, determinemos la dirección de la f. e. m. inducida en los conductores. Empleando la anotación convencional de conexiones de los cables, obtendremos: *1 — 6 — 3 — 8 — 5 — 10 — 7 — 12 — 9 — 14 — 11 — 16 — 13 — 2 — 15 — 4 — 1*.

Todos los conductores quedan unidos y el devanado cerrado. Marcando la dirección de la corriente en las conexiones delanteras (laterales), vemos que las corrientes de los conductores *5* y *8* al encontrarse se dirigen a la delga *3* del colector. A la delga *7* del colector afluyen las corrientes de los conductores *13* y *16*. De la delga *1* del colector, la corriente se bifurca por los conductores *1* y *4*. También de la delga *5* del colector la corriente se bifurca por los conductores *9* y *12*. Las escobillas que están en contacto con las delgas *3* y *7* del colector serán positivas, y las que tocan las delgas

* Aquí las líneas continuas (—) indican la conexión por la parte anterior del inducido, y las líneas punteadas (·····), la conexion por la parte posterior.

1 y *5*, negativas. Conectando las escobillas por pares sacamos al cuadro del generador los bornes «más» y «menos».

En la fig. 274, *b* se da el recorrido de la corriente en los conductores para la posición del inducido representada en la fig. 274, *a*. En este caso el devanado del generador tiene cuatro ramas paralelas. La corriente en la red exterior será cuatro veces mayor que la que

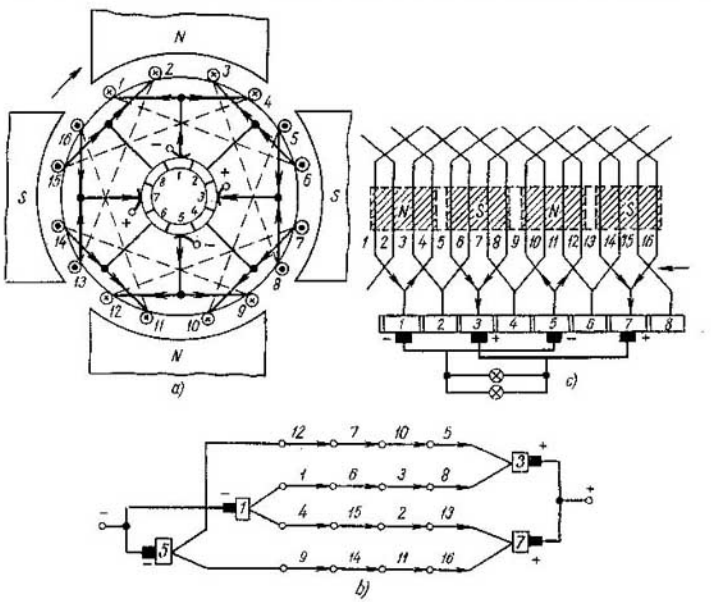


Fig. 274. Devanado imbricado del inducido de un generador tetrapolar: *a* — esquema de la disposición de los devanados, *b* — distribución de la corriente en los conductores del devanado, *c* — esquema desplegado

pasa por los conductores del devanado del inducido del generador tetrapolar. Los generadores multipolares permiten aumentar la potencia que entrega la máquina a la red. Un generador de seis polos tendrá seis ramas paralelas y seis escobillas (tres positivas y tres negativas).

A menudo el devanado se representa en forma desplegada. El esquema desplegado del devanado del inducido expuesto en la fig. 274, *a* está representado en la fig. 274, *c*.

Analizando la fig. 274, *c*, observamos, que el devanado tiene forma de lazos y se le denomina devanado i m b r i c a d o o e n p a r a l e l o, ya que el devanado del inducido forma ramas

paralelas. Sin embargo, el devanado imbricado no es la única forma de montaje del devanado del inducido.

El devanado imbricado se obtiene si el conductor que está bajo un polo se conecta con el que se halla bajo otro polo, y, al dirigirse al tercer conductor regresa bajo el primer polo. Pero, si el segundo conductor se conecta con cualquier otro que esté bajo el siguiente (tercer) polo, obtendremos otro tipo de devanado, cuya forma se asemeja a una onda y por eso se denomina ondulado.

En la fig. 275, *a* se muestra el montaje de un devanado ondulado del inducido con 18 conductores para un generador tetrapolar. Teniendo en cuenta la dirección de rotación del inducido y aplicando la «regla de la mano derecha», determinamos la dirección de la f. e. m. inducida en los conductores del devanado. Empleando la anotación convencional de conexiones de los conductores obtendremos: *1—6—11—16—3—8—13—18—5—10—15—2—7—12—17—4—9—14—1*. Todos los conductores quedan unidos y el devanado cerrado. Unimos las conexiones delanteras (laterales) con nueve delgas del colector. Contra las láminas *2*, *4*, *6* y *9* apretamos dos escobillas positivas y dos negativas. En la fig. 275, *b* está indicado el recorrido de la corriente en los conductores del devanado para la posición del inducido representada en la fig. 275, *a*. Observando la fig. 275, *b* notamos la presencia de sólo dos ramas paralelas formadas por el devanado del inducido. Resulta que, al montar un devanado ondulado de un generador con cualquier número de polos, el devanado puede tener sólo dos circuitos paralelos. El devanado ondulado se denomina en serie, diferenciándose del devanado en paralelo o imbricado, en el cual el número de ramas paralelas del inducido es igual al de los polos. Para la posición del inducido representada en la fig. 275, *a*, las espiras *7—12* y *11—16* no participan en la creación de la f. e. m. del generador, ya que están cortocircuitadas por las escobillas. La corriente en las espiras cerradas es pequeña, si tomamos en cuenta que se encuentran cerca de la zona neutra y que la f. e. m. inducida en éstas es muy baja. En la fig. 275, *c*, se muestra el esquema desplegado del devanado para la posición del inducido representada en la fig. 275, *a*.

En la fabricación de generadores para altas tensiones se da preferencia al devanado ondulado. La irregularidad del entrehierro, las formas distintas de los terminales polares y el centrado incorrecto del inducido provocan la aparición, en los conductores del devanado del inducido, de f. e. m. de diferente magnitud. Puesto que los elementos del devanado imbricado están bajo un polo, esto llevará a producir diferentes f. e. m. de las distintas ramas paralelas, lo que originará corrientes de compensación en el devanado del inducido. El devanado ondulado no tiene dicho defecto. La irregularidad del sistema magnético, debido a la diferencia de los flujos de los diferentes circuitos magnéticos, condicionada por la posición

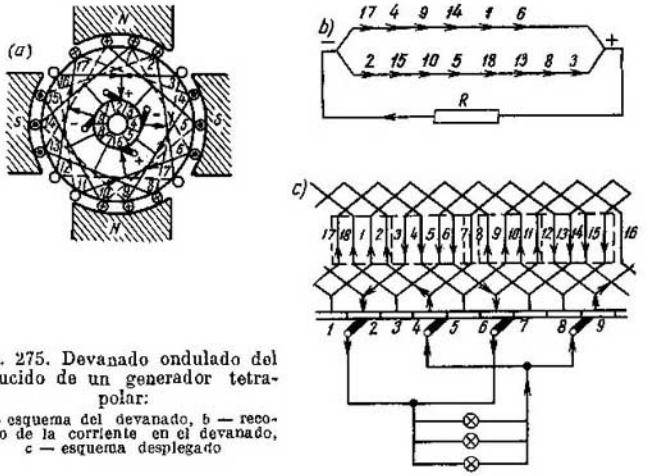


Fig. 275. Devanado ondulado del inducido de un generador tetrapolar:
a — esquema del devanado, b — recorrido de la corriente en el devanado, c — esquema desplegado

excéntrica del inducido respecto a los polos y por cráteres que se forman al moldear la carcasa, se refleja poco en el devanado ondulado, ya que sus secciones se encuentran bajo distintos polos. Por eso la irregularidad indicada influye casi igualmente sobre las magnitudes de las f. e. m. que se inducen en las ramas paralelas del devanado del inducido. En máquinas de alta potencia y tensión baja, cuando la corriente entregada por el generador a la red es grande, es más ventajoso dividir el devanado del inducido en gran número de ramas paralelas, es decir, montar un devanado imbricado.

La parte del devanado (fig. 276), comprendida entre dos delgas del colector, dispuestas una tras otra, se llama sección. La sección consta de dos lados activos, cada uno de los cuales se hace de uno o varios conductores. El arco de la circunferencia del inducido entre el lado activo inicial y el final de la sección se llama primer paso parcial (y_1), y la distancia entre el lado activo final de una sección

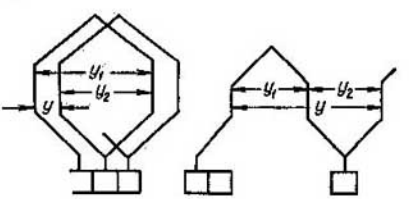


Fig. 276. Cálculo del paso en los devanados imbricado y ondulado

y el inicial de la siguiente sección, segundo paso parcial (y_2). La distancia entre los lados activos iniciales de dos secciones vecinas se llama paso del devanado (y).

En la fig. 276 están representadas las secciones de los devanados imbricado y ondulado. Como se ve en el dibujo, el paso en el devanado imbricado es igual a la diferencia de los pasos parciales:

$$y = y_1 - y_2.$$

El paso en el devanado ondulado es igual a la suma de los pasos parciales:

$$y = y_1 + y_2.$$

Volviendo al devanado imbricado del inducido expuesto en la fig. 274, *a*, vemos que para este devanado el primer paso parcial es igual a cinco, el segundo paso parcial, a tres*. Realizando el arrollamiento desde el primer conductor, obtenemos:

$$1+5=6; \quad 6-3=3; \quad 3+5=8; \quad 8-3=5, \quad \text{etc.}$$

Para el devanado ondulado representado en la fig. 275, *a*, obtenemos: $y_1 = 5$; $y_2 = 5$, por eso, realizando el arrollamiento, desde el primer conductor, se tiene:

$$1+5=6; \quad 6+5=11; \quad 11+5=16; \quad 16+5=21; \quad 21-18=3, \quad \text{etc.}$$

Los lados activos de una sección constan generalmente de varios conductores. En este caso los conductores de una sección están aislados en conjunto y se alojan en las ranuras correspondientes.

§ 135. Magnitud de la f. e. m. inducida en el inducido del generador de corriente continua

Hallemos la fórmula con ayuda de la cual se puede determinar la magnitud de la f. e. m. inducida en una máquina de corriente continua.

Como es sabido, la magnitud de la f. e. m. inducida es proporcional a la velocidad de la variación del flujo magnético con respecto al tiempo:

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

Durante un giro del inducido de un generador bipolar cada conductor del devanado cruza dos veces el campo magnético de la máquina.

Si la velocidad de rotación de la máquina es de $\frac{n}{60}$ r. p. m., el número de líneas magnéticas cruzadas por el conductor en una uni-

* Aquí como unidad está adoptado el arco de la circunferencia del inducido entre dos conductores vecinos.

dad de tiempo será:

$$2\Phi \frac{n}{60}.$$

Por consiguiente, la magnitud de la f. e. m. será igual a:

$$e = 2\Phi \frac{n}{60} \text{ V}.$$

Si el devanado del inducido tiene dos circuitos paralelos, cada rama constará de $N/2$ conductores del número total de conductores N del inducido. La f. e. m. inducida en cada rama se determinará por la siguiente expresión:

$$e = 2\Phi \frac{n}{60} \cdot \frac{N}{2} \text{ V}.$$

Hasta ahora hemos estudiado un generador con dos polos, para el cual $p = 1$ ó $2p = 2$. En una máquina con $2p$ polos el número de líneas magnéticas cruzadas por el conductor durante una vuelta del inducido no será 2Φ, sino $2p\Phi$.

La magnitud de la f. e. m. inducida en este caso será:

$$e = 2p\Phi \frac{n}{60} \cdot \frac{N}{2} \text{ V}.$$

Si el devanado del inducido no es de dos ramas paralelas ($a = 1$, $2a = 2$), sino de $2a$ ramas, el número de conductores en cada rama será $\frac{N}{2a}$ y la f. e. m. del generador se determina por la expresión:

$$e = 2p\Phi \frac{n}{60} \cdot \frac{N}{2a} \text{ V}.$$

Definitivamente la f. e. m. del generador de corriente continua puede ser calculada por la fórmula:

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \Phi N.$$

Ejemplo 1. Determinar la f.e.m. del generador en el que:

$$\Phi_{útil} + 0{,}0368 \text{ V} \cdot \text{seg}; \quad N = 500; \quad n = 750 \text{ r. p. m.};$$
$$2p = 6; \quad 2a = 6.$$

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \Phi N = \frac{3}{3} \cdot \frac{750}{60} \cdot 0{,}0368 \cdot 500 = 230 \text{ V}.$$

§ 136. Reacción del inducido. Conmutación. Polos auxiliares (de conmutación)

Durante el trabajo del generador en vacío, la corriente del inducido es muy pequeña o es igual a cero, lo que depende del tipo del generador. En este caso, el campo magnético que crea el devanado de los polos (devanado inductor) para un generador bipolar es como

se muestra en la fig. 277, *a*. Como se ha indicado anteriormente, la línea trazada a través de la mitad de los terminales polares se denomina eje de polos. El eje del campo magnético coincide con el de los polos.

La línea perpendicular al eje del campo magnético, la línea neutra física, coincide en este caso con la línea neutra geométrica (línea $a - b$).

Durante el trabajo del generador pasará a la red exterior, por el devanado del inducido de la máquina, una corriente que creará

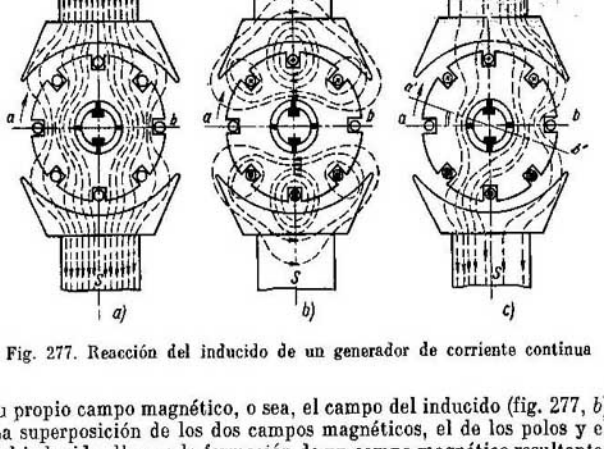


Fig. 277. Reacción del inducido de un generador de corriente continua

su propio campo magnético, o sea, el campo del inducido (fig. 277, *b*) La superposición de los dos campos magnéticos, el de los polos y el del inducido, lleva a la formación de un campo magnético resultante. En la fig. 277, *c*, se muestra el campo magnético resultante del generador. La acción del campo magnético del inducido sobre el de los polos se denomina reacción del inducido. El campo del inducido actuando sobre el de los polos provoca:

1) la desmagnetización de la extremidad de entrada del polo, donde las direcciones de las líneas magnéticas de los campos del polo y del inducido son contrarias, y la magnetización adicional de la extremidad de salida del polo, donde las líneas magnéticas de los campos del polo y del inducido están dirigidas en el mismo sentido. Cuando la magnitud de la inducción magnética en el núcleo del polo es pequeña, la desmagnetización de una mitad del polo es igual a la magnetización de la otra. Cuando la magnitud de la inducción es grande, debido a la saturación magnética, el debilitamiento del flujo magnético en una mitad del polo no se compensa por su

intensificación en la otra, por lo cual el flujo magnético del generador disminuye y la tensión de la máquina cae;

2) la alteración del campo de la máquina y el desplazamiento de la línea neutra física en el sentido de la rotación del generador (posición *a'* y *b'* en la fig. 277, *c*). La magnitud del ángulo de desplazamiento de la línea neutra física depende de la magnitud del campo magnético del inducido, la cual, a su vez, depende de la corriente en el devanado del inducido, es decir, de la carga del generador;

3) la necesidad de decalar las escobillas en el sentido de la rotación del inducido para evitar una formación intensa de chispas. Para no desplazar continuamente las escobillas, al variarse constantemente la carga del generador, se emplean polos auxiliares especiales cuya acción vamos a estudiar a continuación.

Cuando el inducido del generador gira, los conductores del devanado pasan de una rama paralela a otra. Esto ocurre en el momento cuando las secciones del devanado, después de pasar un polo, intersecan la línea neutra física y entran en la zona de acción del polo vecino de diferente signo. La dirección de la f. e. m. inducida en la sección se invierte. El proceso de conmutación de las secciones del devanado de un circuito paralelo a otro y los fenómenos ligados con éste se denominan c o n m u t a c i ó n. Durante cierto tiempo (período de conmutación) en la sección que se conmuta y que pasa por la zona de conmutación, la corriente invierte su dirección. Como es sabido, todo cambio de la corriente en el conductor provoca un cambio del campo magnético, lo que lleva al surgimiento de la f. e. m. de autoinducción en el conductor. Según la ley de Lenz, la f. e. m. de autoinducción tiende a detener el cambio de la corriente en la sección del devanado, debido a lo cual el proceso de conmutación se alarga.

La magnitud de la f. e. m. de autoinducción depende de la inductancia de la sección que se conmuta y de la velocidad del cambio de la corriente en ésta.

Puesto que el proceso de conmutación es muy complicado, trataremos de representarlo en forma simplificada, no teniendo posibilidad de exponer aquí el fenómeno con más detalles. En la fig. 278, *a* se muestra una sección del devanado *abc* que se encuentra en la zona de conmutación. De las dos ramas paralelas vecinas, la corriente llega a la delga *1* del colector y sale a través de la escobilla positiva, a la red exterior. Para simplificar supongamos que la anchura de la escobilla es igual a la de la delga del colector. En la posición indicada en la fig. 278, *b*, la sección *abc* se ha desplazado a un lado y la escobilla se puso en contacto con la delga *2* del colector. Comparando ambas posiciones notamos que la dirección de la corriente en los conductores ha cambiado. Si antes la corriente pasaba desde *c* hacia *a*, en el segundo caso fluye desde *a* hacia *c*. El cambio de la corriente en los conductores ha ocurrido en el tiempo durante el cual la escobilla ha pasado de una delga del colector a la otra.

En la fig. 278, *b* se muestra la posición intermedia de la sección que se conmuta al pasar la escobilla de la delga *1* del colector a la delga *2*.

Mientras la escobilla tocaba por igual las delgas *1* y *2* del colector, la sección del devanado *abc* se encontraba en la línea neutra física. Si el proceso de conmutación no fuese acompañado por fenómenos suplementarios complicados, en la sección del devanado la corriente sería igual a cero. En este caso en los conductores de unión *a* y *c* pasarían corrientes inversamente proporcionales a las resistencias transitorias entre la escobilla y las delgas del colector, en otras palabras, directamente proporcionales a las superficies de contacto

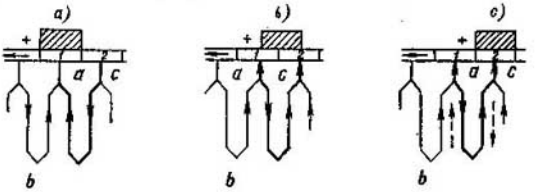


Fig. 278. Conmutación de la corriente en la sección

de la escobilla con las delgas del colector. En la posición, cuando una mitad de la escobilla hacía contacto con la delga *1*, y la otra con la delga *2*, a través de los conductores de unión *a* y *c* pasaban corrientes iguales, cuya suma era igual a la corriente que salía de la escobilla positiva a la red. A medida que la escobilla se desplace de la delga *1* y vaya cubriendo la delga *2*, la superficie de contacto de la escobilla con la delga *1* va reduciéndose, y con la delga *2*, creciendo. Esto provocará la disminución de la corriente en el conductor *a* y el aumento correspondiente de la misma en el conductor *c*. La corriente en la sección del devanado aumentará. En realidad, el proceso de conmutación se complica debido a que en la sección del devanado aparece la f.e.m. de autoinducción, que crea una corriente cuya dirección es contraria a la de la corriente en los conductores de la sección. En la fig. 278, *c* la dirección de la corriente creada por la f.e.m. de autoinducción está indicada con flechas punteadas. En el dibujo se ve que en el conductor de unión *a*, las corrientes tienen una dirección, en el conductor *c*, diferentes. Esto lleva al aumento de la densidad de la corriente bajo la extremidad de salida de la escobilla y a la disminución de la densidad de la corriente bajo la extremidad de entrada de la misma. El aumento de la densidad de la corriente en la escobilla provoca su recalentamiento y formación de chispas en el colector que pueden deteriorarlo.

El chisporroteo de las escobillas puede ser por otras causas, como, por ejemplo: mal estado de la superficie del colector, ensuciamiento del colector y de las escobillas, vibración de la máquina, gran dife-

rencia de potenciales entre las delgas vecinas del colector, carga excesiva del generador, etc.

Al acercarse a la zona de conmutación, la sección del devanado tiene la dirección de la corriente correspondiente a la de la f. e. m. inducida de la rama paralela de donde sale la sección. Para una buena conmutación es necesario que, en la sección sobre la que se encuentra la línea neutra física y que está cortocircuitada por la escobilla, la corriente sea igual a cero. Pero la f.e.m. de autoinducción que surge en la sección y que está dirigida en el mismo sentido

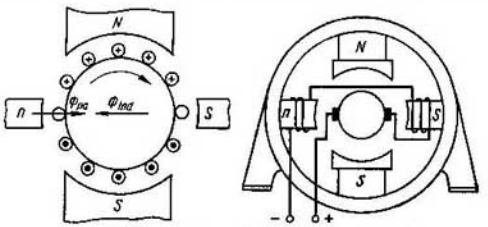


Fig. 279. Polos auxiliares y su conexión

que la f.e.m. en los conductores, impedirá el cambio de la corriente, tratando de conservar la magnitud anterior y la dirección de la corriente. De aquí se comprende la tendencia de interrumpir la acción de la f.e.m. de autoinducción. Para este fin las escobillas del generador se desplazan de la línea neutra física a cierto ángulo en el sentido de la rotación del inducido. En el elemento que se conmuta y que entra en el campo magnético de otra polaridad se inducirá una f.e.m. de dirección contraria a la f.e.m. de autoinducción. Puesto que la magnitud de la f.e.m. de autoinducción depende de la magnitud de la corriente en los conductores del devanado, o, en otras palabras, de la carga del generador, entonces, si las cargas son diferentes, en la sección que se conmuta surgirá una f.e.m. de autoinducción de diferente magnitud.

Para asegurar una compensación constante de la f.e.m. de autoinducción sería necesario cambiar ininterrumpidamente la posición de las escobillas, lo que prácticamente es imposible. Por eso las máquinas modernas de corriente continua tienen p o l o s a u x i l i a r e s dispuestos entre los principales. En este caso las escobillas se instalan sobre la línea neutra geométrica. El campo magnético que crean los polos auxiliares induce en los conductores que pasan por la zona de conmutación una f.e.m. dirigida contra la de autoinducción, asegurando de este modo una buena conmutación y eliminando el chisporroteo de las escobillas.

Para compensar la f.e.m. de autoinducción, que varía en función de la carga, hace falta que el campo magnético de los polos

auxiliares varíe proporcionalmente a la carga del generador. Para este fin el devanado de los polos auxiliares se conecta en serie con el del inducido.

En la fig. 279 se muestra la posición y la conexión del devanado de los polos auxiliares. Aquí se ve que en el generador, detrás del polo principal en el sentido de rotación del inducido, hay un polo auxiliar de signo contrario. El campo magnético de los polos auxiliares tiene dirección contraria al campo del inducido y lo compensa.

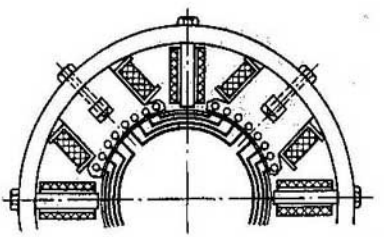


Fig. 280. Esquema de un devanado de compensación

Para los generadores que trabajan con carga que cambia bruscamente (elevadores, grúas, trenes de laminado) se utiliza a veces un devanado de compensación, alojado en ranuras hechas especialmente en los terminales polares. La dirección de la corriente del devanado de compensación debe ser contraria a la de la corriente en los conductores del devanado del inducido. En el arco que abarca el terminal polar, el campo magnético del devanado de compensación equilibrará el campo de reacción del inducido, no admitiendo la alteración del campo de la máquina. El devanado de compensación, igual que el de los polos auxiliares, se conecta en serie al del inducido. En la fig. 280 se muestra el esquema de un devanado de compensación.

§ 137. Tipos de generadores de corriente continua

Según el modo de crear el campo magnético, los generadores de corriente continua se dividen en tres grupos: 1) generadores con imanes permanentes o magnetoeléctricos, 2) generadores con excitación independiente, 3) generadores con autoexcitación.

Los generadores magnetoeléctricos constan de uno o varios imanes permanentes en cuyo campo gira el inducido con devanado. En vista de que estos generadores dan una potencia muy pequeña, este tipo de generadores no se emplea para fines industriales.

En los generadores con excitación independiente los devanados de los polos se alimentan de una fuente ajena de tensión continua,

independiente del generador (un generador de corriente continua, rectificador, etc.).

La alimentación del devanado inductor de los polos del generador con autoexcitación se efectúa desde las escobillas del inducido de la propia máquina. El principio de autoinducción consiste en lo siguiente. Cuando en el devanado inductor no pasa corriente, el inducido del generador gira en un débil campo magnético de magnetismo remanente de los polos. La insignificante f.e.m. que se induce en el devanado del inducido envía en este momento una corriente débil al devanado de los polos. El campo magnético de los polos crece, por lo cual aumenta también la f.e.m. en los conductores del inducido, lo que a su vez provocará un aumento de la corriente de excitación. Eso continuará hasta que en el devanado inductor se establezca una corriente equivalente a la magnitud de la resistencia del circuito de excitación. La autoexcitación de la máquina ocurrirá sólo cuando la corriente que pasa por el devanado de los polos cree un campo magnético que intensifique el campo de magnetismo remanente y, además, cuando la resistencia del circuito de excitación no supere cierta magnitud determinada.

Según el modo de conexión del devanado inductor con el del inducido, los generadores con autoexcitación se dividen en tres tipos:

1. Generador con excitación en derivación (shunt), en el cual el devanado inductor de los polos está conectado en paralelo al del inducido.
2. Generador con excitación en serie, en el cual el devanado inductor de los polos está conectado en serie al del inducido.
3. Generador con excitación compuesta (compound), en el cual sobre los polos hay dos devanados: uno, conectado en paralelo al del inducido, y otro, conectado en serie al del inducido.

Según el modo de conectar el devanado inductor al del inducido, el generador presenta sus propias particularidades.

§ 138. Generador con excitación independiente

El esquema de este tipo de generador se da en la fig. 281. La corriente de excitación que se proporciona de una fuente ajena al devanado inductor de los polos no depende de las condiciones de trabajo del propio generador. El reóstato en el circuito de excitación permite variar la magnitud de la corriente de excitación, lo que conduce a la variación del flujo magnético de la máquina, y esto, a su vez, a la variación de la f.e.m. o de la tensión del generador. Generalmente este reóstato se llama r e g u l a d o r. El reóstato posee un tercer contacto complementario, que permite poner en cortocircuito el devanado inductor al desconectarse éste. De este modo los contactos extremos del reóstato son protegidos de posibles quemaduras, ya que al desconectar el circuito con gran inductancia,

la corriente, al desaparecer, origina una f.e.m. de autoinducción que sostiene el arco entre la corredera y el contacto extremo del reóstato.

El devanado inductor (de excitación) consta de gran número de espiras de alambre de cobre aislado. Cuando el número de revoluciones del inducido es constante y el generador no está cargado (marcha en vacío), la f.e.m. de la máquina depende sólo de la corriente

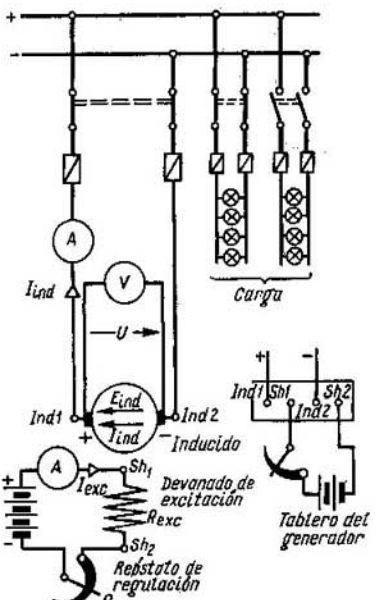


Fig. 281. Esquema de un generador con excitación independiente

de excitación. Cambiando la resistencia del circuito de excitación, mediante el reóstato regulador, y, observando las indicaciones del amperímetro en el circuito de excitación y del voltímetro conectado a las escobillas del generador, establecemos la relación entre la f.e.m. del generador durante la marcha en vacío de la máquina y la corriente de excitación. Esta función está representada por una curva denominada característica en vacío o característica a circuito abierto (fig. 282).

Durante la primera magnetización del generador, cuando no hay corriente de excitación ($I_{exc} = 0$), el voltímetro de la máquina estará en el cero para cualquier número de revoluciones del induci-

do. El aumento de la corriente de excitación irá acompañado, al principio, de un crecimiento proporcional de la f.e.m. del generador. La parte correspondiente de la característica en vacío será casi una línea recta. Pero el aumento ulterior de la corriente de excitación provocará la saturación magnética de la máquina, debido a lo cual la curva se hace más pronunciada. Si disminuimos la corriente de excitación del generador, podemos notar que para las mismas magnitudes de la corriente de excitación, la f.e.m. del generador tendrá magnitudes mayores que durante la magnetización, y la curva de desmagnetización pasará un poco más arriba que la de magnetización. Esto se explica por el fenómeno de histéresis. Al disminuir

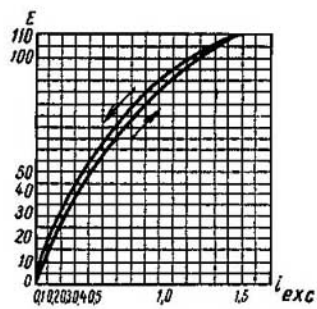


Fig. 282. Característica en vacío de un generador con excitación independiente

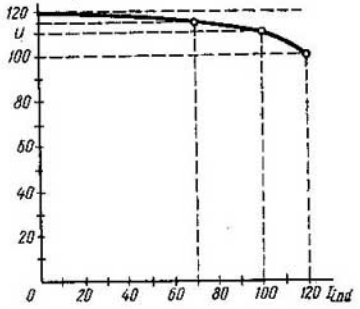


Fig. 283. Característica exterior de un generador con excitación independiente

la corriente de excitación hasta cero, el generador tendrá, a cuenta del magnetismo remanente, cierta f.e.m. Cuanto más alejado se encuentre el punto que corresponde a la f.e.m. del generador trabajando normalmente de la flexión de la curva característica, tanto menor será la variación de la f.e.m. de la máquina en función de la corriente de excitación. En este caso la posibilidad de regular la tensión es muy pequeña. Al contrario, si el generador trabaja en la parte casi rectilínea de la característica, las pequeñas variaciones de la corriente de excitación provocarán cambios considerables de la f.e.m. del generador. De este modo, la característica en vacío indica las propiedades magnéticas del generador.

El requisito principal de cualquier generador es que la tensión sea constante para diferentes cargas. Pero, puesto que, durante el trabajo del generador para la red exterior, su tensión varía con la carga, la mejor máquina será aquella que cambie menos la tensión a iguales variaciones de la carga.

La tensión del generador con excitación independiente varía por dos causas al cambiar la carga:

1) debido a la caída de tensión en el devanado del inducido y en el contacto transitorio de las escobillas.

La f.e.m. del generador (E) se diferencia de la tensión en las escobillas (U) en una magnitud igual a la caída de tensión en el devanado del inducido $I_{ind}R_{ind}$

$$E = U + I_{ind}R_{ind} \text{ ó } U = E - I_{ind}R_{ind}.$$

Si, por ejemplo, la f.e.m. del generador es igual a 120 V, y la resistencia del devanado del inducido es igual a 0,01Ω, entonces, cuando la corriente del generador sea de 50 A, la tensión de la máquina será:

$$U = E - I_{ind}R_{ind} = 120 - 50 \cdot 0{,}1 = 119{,}5 \text{ V},$$

cuando la corriente es de 100 A

$$U = 120 - 100 \cdot 0{,}01 = 119 \text{ V},$$

cuando la corriente es de 200 A

$$U = 120 - 200 \cdot 0{,}01 = 118 \text{ V}.$$

De estos ejemplos se ve, que al aumentar la carga del generador su tensión disminuye. Para disminuir la caída de tensión en la resistencia R_{ind}, el devanado del inducido de las máquinas de corriente continua se hace de alambre de cobre y de barras de gran sección. En este caso la resistencia del devanado del inducido resulta muy pequeña, llegando sólo a décimas, centésimas y hasta milésimas de ohmio.

Durante el trabajo en vacío del generador $I_{ind} = 0$, por consiguiente,

$$U = E;$$

2) debido a la reacción del inducido que conduce a la disminución del flujo magnético y de la f.e.m. de la máquina.

Si se carga gradualmente el generador y se va anotando por las indicaciones del amperímetro conectado al circuito del inducido, la magnitud de la corriente de carga, siendo constantes la velocidad de rotación del generador y la corriente de excitación, puede obtenerse la dependencia entre la tensión en los bornes de la máquina y la corriente de carga. Esta dependencia se denomina característica exterior. En la fig. 283 se muestra la característica exterior de un generador con excitación independiente. El eje horizontal representa la corriente de carga, el vertical, la tensión del generador. La característica indica cómo varía la tensión del generador al cambiar la carga. En los generadores con excitación independiente, en caso de carga nominal, velocidad constante y corriente invariable de excitación, la disminución de la tensión puede ser de 5 a 8% de la nominal. Para mantener invariable la tensión del generador, se varía la corriente de excitación mediante el reóstato regulador.

Como se ve en la fig. 281, en el circuito del inducido del generador están intercalados unos fusibles que protegen el devanado del inducido contra un cortocircuito en la red exterior. El cambio de la dirección de rotación del generador lleva al cambio de la polaridad de las escobillas.

§ 139. Generador con excitación en derivación

En la fig. 284 se da el esquema de un generador con excitación en derivación. El devanado inductor de los polos está conectado en paralelo al del inducido. Durante el trabajo del generador la

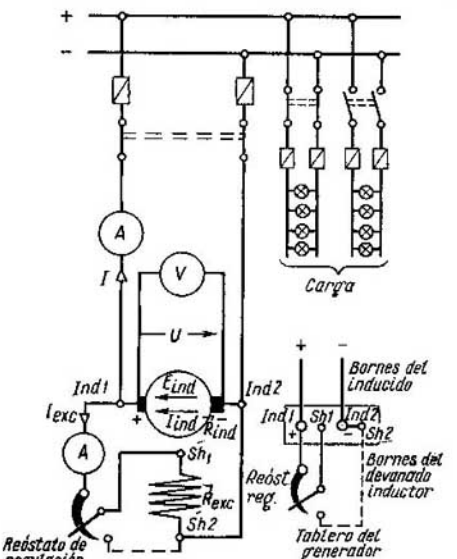


Fig. 284. Esquema de un generador con excitación en derivación

corriente que pasa por el devanado del inducido I_{ind} se deriva de la escobilla positiva por dos ramas paralelas: la red exterior y el devanado inductor. La suma de la corriente de la red I y la corriente de excitación I_{exc}, al llegar a la escobilla negativa, es igual a la corriente del inducido. Por eso se puede escribir:

$$I_{ind} = I + I_{exc}.$$

La potencia útil del generador se caracteriza por la cantidad de corriente que entrega a la red. Por consiguiente, la corriente de

excitación debe ser mínima en lo posible. Generalmente, la corriente de excitación en estos generadores constituye el 2,5% de corriente nominal del inducido. Para crear la fuerza de magnetización necesaria, el devanado inductor se fabrica de gran número de espiras de alambre de cobre delgado y aislado.

Si durante la marcha en vacío del generador cambiamos la corriente de excitación con un reóstato regulador, siendo constante la velocidad del inducido, la f.e.m. del generador variará también. La dependencia entre la f.e.m. y la corriente de excitación de la máquina, como es sabido, se denomina característica en vacío. En los generadores con excitación en derivación esta característica es análoga a la característica en vacío del generador con excitación independiente.

Al cargar el generador con excitación en derivación, su tensión varía en dependencia de la corriente de carga. En estos generadores, la tensión varía al aumentar la carga a consecuencia de tres causas:

1) debido a la caída de tensión en el devanado del inducido y en el contacto transitorio de las escobillas;

2) debido a la disminución del flujo magnético, producida por la reacción del inducido;

3) bajo la acción de las primeras dos causas, la tensión del generador (o la tensión en las escobillas del inducido) disminuye al aumentar la carga. Cuando la resistencia del circuito de excitación es constante, la corriente de excitación es proporcional a la tensión en las escobillas del inducido. Por eso, al disminuir la tensión en el inducido, la corriente de excitación disminuye también, lo que lleva a la reducción del flujo magnético de los polos, y esto, a su vez, provocará un descenso complementario de la f.e.m. y de la tensión en los bornes del generador.

Esto no ocurre en un generador con excitación independiente, ya que el devanado inductor de la máquina se alimenta de una fuente ajena (separada) de corriente continua.

Si la velocidad de rotación del inducido y la resistencia del circuito de excitación son constantes y cambiamos la resistencia de la red exterior, la corriente de la red también variará. Registrando la magnitud de la corriente de la red con el amperímetro intercalado en el circuito del inducido, y determinando las tensiones del generador, con el voltímetro conectado a los bornes de la máquina, se puede establecer la relación entre la corriente de la carga y la tensión del generador. Dicha relación, como hemos visto, se denomina característica exterior. La característica exterior del generador con excitación en derivación se da en la fig. 285. La característica indica que la tensión del generador disminuye al aumentar la carga. En los límites de trabajo normal, la disminución de tensión debida al aumento de la carga, suele ser pequeña (línea continua de la característica). En los generadores con polos auxiliares ésta es de 8 a 15%, siendo nominal la carga. Durante el trabajo del generador,

la variación de la tensión se elimina cambiando las resistencias del circuito de excitación mediante un reóstato regulador. El aumento ulterior de la corriente de carga va acompañado por un descenso considerable de la tensión (línea punteada de la característica). A cierta magnitud de la resistencia del circuito exterior, la corriente de carga alcanza la magnitud máxima crítica $I_{máx}$, después de lo cual la corriente comienza a disminuir incluso si la resistencia del circuito exterior disminuye. Esto se explica por el hecho de que sobre la

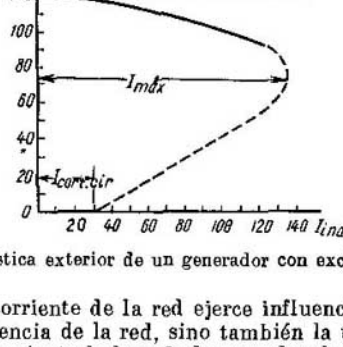


Fig. 285. Característica exterior de un generador con excitación en derivación

magnitud de la corriente de la red ejerce influencia no sólo la magnitud de la resistencia de la red, sino también la tensión del generador. Cuando la corriente de la red alcanza el valor crítico $I_{máx}$, prevalecen los factores mencionados anteriormente, que influyen sobre la disminución de la tensión, y, a pesar de la reducción de la resistencia de la red, la corriente de la red disminuirá.

En caso de cortocircuito, la tensión del generador llega a ser igual a cero y la f.e.m., que se induce en el devanado del inducido a cuenta del magnetismo remanente de los polos, creará en el circuito una corriente de cortocircuito. A veces ocurre, que un generador con excitación en derivación no da tensión al conectarse por primera vez. Esto puede ocurrir debido a que los núcleos de los polos no tienen magnetismo remanente. Si disponen de éste, puede ser que la conexión incorrecta del devanado inductor haya sido la causa de que la corriente en el devanado creara un flujo magnético de excitación dirigido contra el flujo de magnetismo remanente desmagnetizando los polos. En este caso hace falta desconectar los extremos del devanado inductor y conectarlos durante cierto tiempo a una fuente de corriente continua (por ejemplo, a una batería de acumuladores). Esto será suficiente para que los polos adquieran magnetismo remanente y el generador produzca una pequeña f.e.m. durante el trabajo con el devanado desconectado de los polos. Si el generador se conecta por primera vez y no hay seguridad de que la conexión del devanado inductor sea correcta, entonces, se pone en marcha

el generador y con los extremos del devanado inductor se hace contacto con los bornes del inducido en el tablero (observando las reglas de seguridad) y se leen las indicaciones del voltímetro del generador. Si las indicaciones del voltímetro aumentan, esto significa que el devanado inductor está conectado correctamente. Pero, si las indicaciones del voltímetro disminuyen, hay que cambiar de lugares los extremos del devanado inductor. Después de conectar correctamente el devanado inductor, el generador se para y los extremos del devanado inductor se fijan sólidamente en su tablero. El cambio de dirección en la rotación del generador con excitación en derivación lleva consigo un cambio de dirección en la f.e.m. inducida en el devanado del inducido, el cambio de la polaridad de las escobillas y modificación de la dirección de la corriente en el devanado inductor, lo que conduce a la desmagnetización de los polos. Por eso en estos generadores se indica la dirección de rotación del inducido.

§ 140. Generador con excitación en serie

En la fig. 286 se muestra el esquema de un generador con excitación en serie. Puesto que el devanado inductor de este tipo de generadores está conectado en serie con el del inducido, siendo $a = 1$,

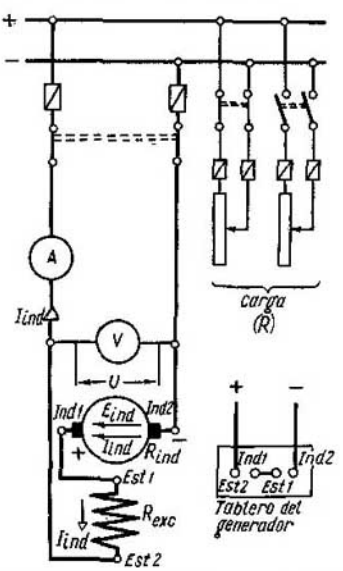


Fig. 286. Esquema de un generador con excitación en serie

por ambos devanados pasa una corriente igual. Por eso el devanado inductor de las máquinas de potencia media y grande, a diferencia de los de excitación en derivación, se fabrica con un número reducido de espiras de alambre de gran sección. Cuando el circuito exterior está abierto, es imposible excitar este generador. Por consiguiente, no es posible tomar de manera habitual la característica en vacío de dicho generador. Al cerrar el circuito exterior, por el devanado del inducido, así como por el inductor pasará la corriente de carga.

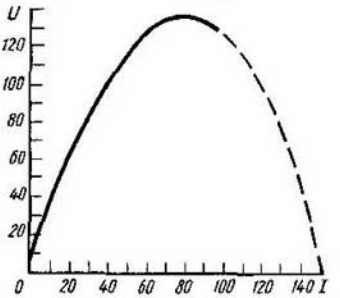


Fig. 287. Característica exterior de un generador con excitación en serie

Al aumentar la carga del generador, crecerá el flujo magnético de los polos, lo que llevará al incremento de la f.e.m. y de la tensión del generador. Por lo tanto, la característica exterior del generador con excitación en serie tendrá el aspecto indicado en la fig. 287 (línea continua de la característica). De este modo, vemos que este generador se diferencia por sus propiedades del generador con excitación en derivación, ya que al aumentar la carga en el primero, la tensión crece, mientras que en el segundo, disminuye. Al aumentar la corriente de carga se satura el sistema magnético, la f.e.m. del generador casi no aumenta y la tensión de la máquina comienza a descender. Esto ocurre debido a la intensificación de la reacción del inducido y a la caída de tensión en los devanados del generador (línea punteada de la curva en la fig. 287). En caso de cortocircuito en los bornes del inducido, la corriente del generador tendrá una magnitud considerable y su tensión será igual a cero. La característica exterior del generador indica, que al variar la corriente de carga, la tensión de la máquina cambia bruscamente. Por eso estos generadores se emplean raramente en la práctica.

§ 141. Generador con excitación compuesta (compound)

El esquema del generador con excitación compuesta se da en la fig. 288. Disponiendo de dos devanados en sus polos principales (fig. 289) el generador de este tipo reúne las propiedades de los gene-

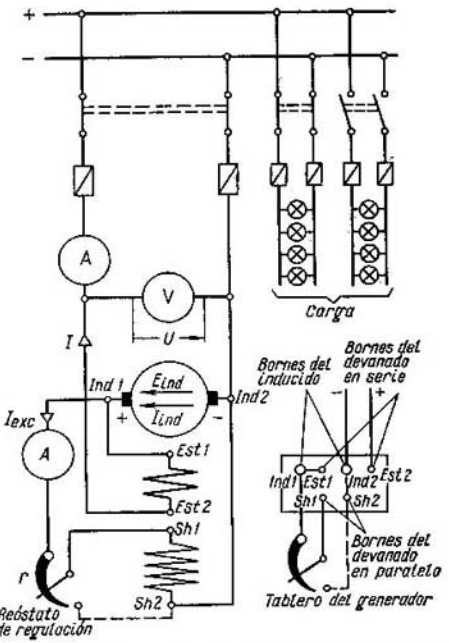


Fig. 288. Esquema de un generador con excitación compuesta

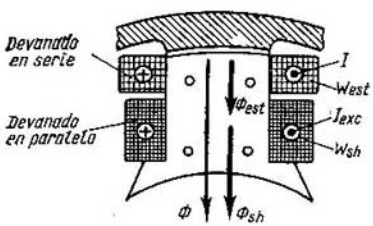


Fig. 289. Polo principal de la máquina con excitación compuesta

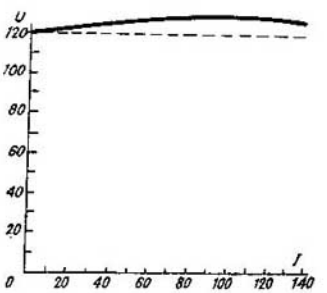


Fig. 290. Característica exterior de un generador con excitación compuesta

radores con excitación en derivación y en serie. La característica en vacío de un generador con excitación compuesta es semejante a a la de un generador con excitación en derivación, ya que durante la marcha en vacío el devanado en serie no funciona. Mientras que en el generador con excitación en derivación la tensión disminuye con la carga, y en el generador con excitación en serie aumenta, en el generador con excitación compuesta se puede alcanzar una variación insignificante de tensión de la máquina al variar su carga, escogiendo el número correspondiente de espiras de los devanados en paralelo y en serie del generador. Puede parecer que, al fin, se ha obtenido un generador que puede dar al consumidor una tensión constante.

Sin embargo, al variar la corriente de carga, cambiará la magnitud de caída de tensión en los conductores que van del generador al consumidor. Por eso, siendo constante incluso la tensión del generador, la del consumidor cambiará. Para evitar esto, el número de espiras del devanado en serie del generador con excitación compuesta se elige de modo que el campo magnético creado por dicho devanado, no sólo compense la caída de tensión producida por la acción de la reacción del inducido y por la caída de tensión en los devanados de la máquina, sino que sea algo mayor. En este caso la tensión del generador aumentará un poco al aumentar la carga, lo que permitirá compensar la caída de tensión en los conductores de entrada. Por esto, la tensión que va al consumidor será casi constante. La característica exterior del generador con excitación compuesta se da en la fig. 290.

§ 142. Trabajo en paralelo de los generadores con excitación en derivación

Para que los generadores de corriente continua trabajen en paralelo es necesario cumplir las siguientes condiciones:

1. La tensión del generador que se conecta debe ser igual a la de la red o a la del generador que esté funcionando.

2. La polaridad de los bornes del generador que se conecta y la de la red debe ser igual (el «más» del generador ha de conectarse al «más» de la red, y el «menos» del generador, al «menos» de la red).

La primera condición del trabajo en paralelo de los generadores, es decir, la igualdad de tensiones, se logra del modo siguiente. Se pone en marcha el motor primario, que hace girar el generador que se conecta, y su velocidad de rotación se lleva hasta la nominal. Variando la resistencia del reóstato regulador del generador se establece la tensión del generador igual a la de la red o a la del generador que esté funcionando. La igualdad de tensiones se comprueba con los voltímetros conectados a la red y al generador o con un voltímetro con conmutador.

La segunda condición del trabajo en paralelo, es decir, la coincidencia de polaridades, se comprueba sólo para el generador que se conecta por primera vez para el trabajo en paralelo. Los bornes del generador se colocan de modo que durante las conexiones ulteriores dicha condición sea cumplida de antemano. Se puede comprobar la polaridad mediante un voltímetro magnetoeléctrico o con ayuda de lámparas de incandescencia. Con el interruptor de cuchilla de la máquina desconectado, cualquier par de bornes de la red y del

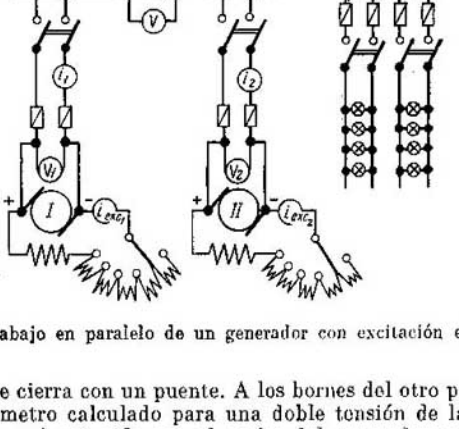


Fig. 291. Trabajo en paralelo de un generador con excitación en derivación

generador se cierra con un puente. A los bornes del otro par se conecta un voltímetro calculado para una doble tensión de la red. Si el «más» de la red coincide con el «más» del generador y el «menos» de la red con el «menos» del generador, el voltímetro quedará en el cero.

Si la conexión no es correcta, el voltímetro indicará una doble tensión.

En la fig. 291 está representado el esquema de conexiones en paralelo de dos generadores con excitación en derivación. El generador conectado en paralelo a la red o conjuntamente con otro funcionando, no da corriente, ya que la f.e.m. del generador es igual y opuesta a la tensión de la red. Para que el generador comience a entregar corriente a la red hace falta aumentar su f.e.m. mediante el reóstato regulador.

La corriente que el generador entrega a la red, al pasar por el devanado del inducido del generador y actuando mutuamente con el flujo magnético de los polos, crea un par de resistencia contrario al de rotación del motor primario del generador. Por eso, al aumentar la corriente de carga, la potencia mecánica del motor primario también debe aumentar.

Para conmutar la carga de un generador a otro es necesario cambiar simultáneamente la resistencia de los reóstatos reguladores, aumentando la corriente de excitación del generador que ha de ser cargado y disminuyendo la corriente de excitación del generador que ha de ser descargado.

Puede ocurrir, que durante el trabajo del generador su f.e.m. descienda (por ejemplo, al disminuir la velocidad del motor primario o al romperse la correa de transmisión del motor primario que pone en rotación el generador). En este caso la corriente de la red llegará al generador y éste funcionará como motor eléctrico. Para evitar esto, en el circuito del generador se intercalan elementos automáticos especiales, que desconectan el generador tan pronto como su corriente cambie de dirección.

§ 143. Funcionamiento de una máquina de corriente continua como motor eléctrico

Si conectamos una máquina de corriente continua a una fuente de tensión, aquélla comienza a funcionar como motor eléctrico, es decir, transforma la energía eléctrica en mecánica. Esta propiedad de las máquinas eléctricas de funcionar tanto en calidad de generador, como en calidad de motor, se llama r e v e r s i b i l i d a d.

El motor eléctrico fue inventado en 1834 por el académico ruso B. Jacobi. A fines de 1838 Jacobi utilizó su electromotor para mover buques. Para alimentar el motor se utilizó una pila galvánica.

Jacobi elaboró un tipo de colector para máquinas de corriente continua, que en sus rasgos principales se emplea hasta ahora.

A pesar de que existen motores de corriente alterna más sencillos en su construcción y más cómodos en su empleo, en la práctica se utilizan ampliamente también de corriente continua. La ventaja principal de estos motores, regulación amplia de velocidad, hace posible emplear los motores de corriente continua en el transporte electrificado, en los mecanismos elevadores de carga, en la minería, en diversos esquemas de regulación y dirección automática, etc.

En la URSS se fabrican motores de corriente continua con amplia escala de potencias.

Los motores utilizados en la tracción de tranvías tienen potencia de 33 a 54,5 kW, 550 V y de 560 a 660 r. p. m. Para las locomotoras eléctricas se emplean motores de 320 a 450 kW de potencia, 750 y 1.500 V. Los motores de grúas se fabrican de 3 a 100 kW. Para hacer funcionar trenes de laminado, se instalan motores de corriente continua de varios miles de kilovatios de potencia.

La estructura de los motores eléctricos es la misma que la de los generadores. El principio de funcionamiento de los motores eléctricos de corriente continua se basa en la interacción de la corriente que pasa en el devanado del inducido y del campo magnético creado por los polos de los electroimanes. Por eso, para el par de arranque del motor se puede escribir:

$$M_{arr} = cI_{ind} \cdot \Phi,$$

donde c = coeficiente de proporcionalidad que tiene en cuenta las magnitudes constantes para el motor dado: número de pares polares, número de conductores del devanado del inducido, número de ramas paralelas del devanado del inducido;

I_{ing} = corriente del inducido;

Φ = flujo magnético.

Siendo constante la velocidad de rotación el par que desarrolla el motor es igual al de resistencia de la carga mecánica aplicada al árbol del motor:

$$M_{arr} = M_{res}.$$

La potencia que el motor toma de la red, es mayor que la potencia en el árbol en una magnitud igual a las siguientes pérdidas: por fricción en los cojinetes, por fricción de las escobillas con el colector y del inducido con el aire, así como de las pérdidas en el hierro por histéresis y corrientes parásitas, las pérdidas de potencia en el calentamiento de los devanados del motor y de los reóstatos. El rendimiento del motor eléctrico varía con la carga. Siendo la potencia nominal, la magnitud del rendimiento de los motores oscila entre 70 y 93%, en dependencia de la potencia, de la velocidad de rotación y de la construcción del motor.

El cambio de dirección de rotación del motor puede realizarse mediante el cambio de dirección de la corriente en el devanado del inducido o en el de los polos. El motor, en el cual se cambia simultáneamente la dirección de la corriente, tanto en el devanado del inducido, como en el de los polos, girará en el mismo sentido que antes. De acuerdo con la conexión del devanado del inducido y del devanado inductor, los motores eléctricos de corriente continua se dividen en motores con excitación en derivación, en serie y compuesta.

§ 144. Empleo del colector en los motores eléctricos de corriente continua

Encontrándose en el campo magnético creado por los polos, los conductores del devanado del inducido, por los cuales pasa la corriente, se someten a la acción de una fuerza de repulsión. Para que el inducido del motor gire en un sentido determinado, es necesario que la dirección de la corriente en el conductor se invierta tan pronto como éste salga de la zona de acción de un polo, cruce la línea neutra y entre en la zona de acción del polo inmediato de signo contrario. El colector se utiliza para cambiar la dirección de la corriente en los conductores del devanado del inducido del motor en el momento en que los conductores pasan la línea neutra. El funcionamiento del colector está gráficamente representado en la fig. 292. El conductor arrollado en espira está alojado en el campo magnético. Los extremos de la espira están soldados a las delgas a y b del colector,

con las cuales están en contacto las escobillas; a la escobilla izquierda se conecta el «más» de la red, a la derecha, el «menos». En la posición *I* la corriente de la red va a la delga *a* del colector, de ésta pasa por el conductor superior *1* de la espira, teniendo la dirección «desde nosotros», vuelve por el conductor inferior *2* de la espira, yendo «hacia nosotros» (la conexión posterior del cuadro no se muestra en el esquema), llega a la delga *b* del colector y de aquí, a través de la escobilla, sale a la red. Aplicando la «regla de la mano izquierda» determinamos que la espira tratará de girar en el sentido contrario a las manecillas del reloj. En la posición *II* la espira está en la línea neutra. Las delgas del colector no hacen contacto

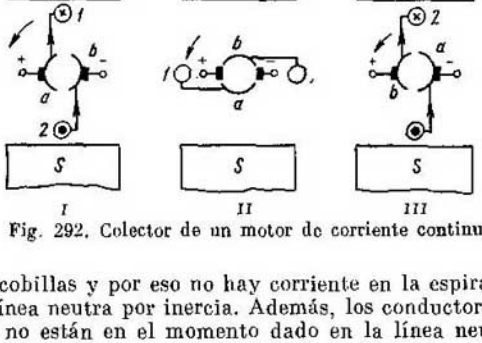


Fig. 292. Colector de un motor de corriente continua

con las escobillas y por eso no hay corriente en la espira. La espira cruza la línea neutra por inercia. Además, los conductores del inducido, que no están en el momento dado en la línea neutra, siguen creando el par de arranque y ayudarán a la espira sin corriente a pasar la posición neutra.

En la posición *III* la parte *1* (inferior) de la espira se coloca bajo otro polo y la dirección de la corriente en el conductor cambia. Lo mismo ocurre con la parte *2* (superior) de la espira. Ahora bajo la escobilla positiva se encuentra la delga *b* del colector, bajo la escobilla negativa, la delga *a*. Aplicando la regla de la mano izquierda nos convencemos de que la dirección de rotación de la espira permanece igual, es decir, en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Por consiguiente, tan pronto como el conductor en su movimiento interseque la línea neutra, la delga del colector, conectada a este conductor, pierde el contacto con la escobilla que tiene una polaridad y se acerca a la que tiene otra distinta.

§ 145. Fuerza contraelectromotriz del inducido

Al girar el inducido del electromotor su devanado interseca el campo magnético, debido a lo cual en el devanado surge, de acuerdo con la ley de inducción electromagnética, una f.e.m. inducida.

Como puede observarse en la fig. 293, la dirección de la f.e.m. que se induce en el conductor, determinada por la regla de la mano derecha, es contraria a la tensión de la red, debido a lo cual ha recibido la denominación de fuerza contraelectromotriz. De aquí que la corriente en el devanado del inducido del motor durante su funcionamiento sea:

$$I_{ind} = \frac{U - E}{R_{ind}},$$

donde U = tensión de la red;
E = fuerza contraelectromotriz;
R_{ind} = resistencia del devanado del inducido del motor.

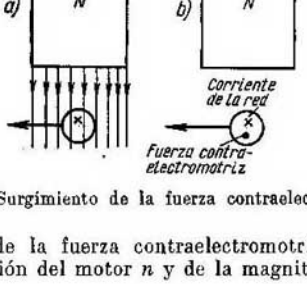


Fig. 293. Surgimiento de la fuerza contraelectromotriz

La magnitud de la fuerza contraelectromotriz depende de la velocidad de rotación del motor n y de la magnitud del flujo magnético Φ:

$$E = cn\Phi,$$

donde c = coeficiente de proporcionalidad que depende del número de pares de polos, del número de conductores y del número de ramas paralelas en el devanado del inducido.

La tensión aplicada al inducido del motor debe compensar la fuerza contraelectromotriz y la caída de tensión en el devanado del inducido.

$$U = E + I_{ind}R_{ind}.$$

Pero puesto que la resistencia del devanado del inducido es reducida (décimas, centésimas y hasta milésimas de ohmio), la caída de tensión es también insignificante. Por eso la fuerza contraelectromotriz es casi igual a la tensión de la red.

Ejemplo 1. Determinar la corriente que consume un motor alimentado de una red de 120 V; la fuerza contraelectromotriz es de 119,5 V; la resistencia del devanado del inducido es de 0,01 Ω:

$$I_{ind} = \frac{U - E}{R_{ind}} = \frac{120 - 119{,}5}{0{,}01} = 50 \text{ A}.$$

En el momento de arranque, la velocidad de rotación del motor es igual a cero. Por eso la fuerza contraelectromotriz es también igual a cero. La corriente de arranque del motor en este caso es igual a la tensión de la red dividida por la resistencia del inducido, alcanzando la corriente del inducido una magnitud que resulta peligrosa para el devanado del inducido y el colector.

Para evitar esto, durante el arranque se conecta en serie al circuito del inducido de los motores de corriente continua una resistencia determinada que sirve para limitar la corriente de arranque. La resistencia es del tipo reóstato, denominado de arranque. Para fabricar la resistencia de reóstatos de arranque de alta resistividad ($\rho = 0{,}4 - 0{,}5$) son utilizados la niquelina (aleación de cobre, níquel y zinc) y constantán (aleación de cobre, níquel y aluminio). Las resistencias se hacen en forma de alambre o cinta arrollada fijada en un cuadro o armazón aislante. En los reóstatos para grandes corrientes (motores de grúas) se emplean resistencias de hierro fundido moldeadas en zigzag, puestas sobre barras aisladas de acero y ajustadas con tuercas. Al pasar la corriente por las resistencias del reóstato, se calientan y desprenden calor. El enfriamiento de los reóstatos puede ser por aire y por aceite. Los reóstatos de enfriamiento por aire están cubiertos de una camisa metálica con orificios, a través de los cuales sale el aire caliente, dejando pasar el aire frío. Las resistencias de los reóstatos de enfriamiento por aceite se colocan dentro de un recipiente con aceite de mayor conductividad térmica que la del aire, debido a lo cual los reóstatos de aceite son más compactos que los de aire.

A medida que la velocidad de rotación del motor aumenta, en el devanado del inducido surge una fuerza contraelectromotriz y la corriente del inducido comienza a disminuir rápidamente. En este caso la resistencia del reóstato de arranque será no sólo inútil, sino nociva, ya que al disminuir la corriente, ésta reduce el par de arranque y no permite que la velocidad del motor aumente rápidamente. Por eso, al comenzar la marcha, la resistencia del reóstato de arranque tiene que estar completamente adicionada. A medida que aumenta la velocidad de rotación del motor es necesario disminuir gradualmente la resistencia del reóstato y, eliminarla al finalizar el proceso de puesta en marcha. Conviene tener presente, que el reóstato de arranque está calculado para un paso breve de la corriente (sólo para el tiempo de puesta en marcha). Por eso, si al finalizar la puesta en marcha, el reóstato no está completamente fuera del circuito, la parte de la resistencia por la que pasa la corriente puede quemarse.

Para que la fuerza contraelectromotriz aumente con mayor rapidez en el momento de puesta en marcha hay que observar que el motor reciba excitación completa, es decir, que en el circuito de excitación no esté conectada alguna resistencia y, en todo caso, que no se rompa o desconecte el devanado inductor. El reóstato de arranque

se elige de tal manera que la corriente de puesta en marcha del motor no sea menor que la corriente nominal, sino que sea 2 ó 2,5 veces mayor que ésta. De este modo se obtiene, por un lado, economía de materiales y de costo del reóstato y, por otro, que una corriente más grande dé la posibilidad al motor de llegar rápidamente a la velocidad normal de rotación.

Ejemplo 2. Calcular la resistencia del reóstato de arranque para un motor cuya corriente nominal es de 20 A, la resistencia del devanado del inducido es de 0,02Ω. La tensión de la red es de 220 V.

Escogemos la corriente de arranque dos veces mayor que la nominal, o sea, $20 \times 2 = 40$ A, y calculamos la resistencia del circuito del inducido:

$$R = \frac{U}{I_{arr}} = \frac{220}{40} = 5{,}2\ \Omega.$$

Puesto que la resistencia del devanado del inducido es de 0,02Ω, que también forma parte del circuito del inducido, la resistencia del reóstato de arranque será:

$$5{,}2 - 0{,}02 = 5{,}18\ \Omega.$$

La igualdad del par de arranque y del par de resistencia de la carga mecánica cuando la velocidad de rotación del inducido es constante, se altera temporalmente si la carga en el árbol del motor varía. Así, por ejemplo, al aumentar el par de resistencia, éste será mayor que el par de arranque y la velocidad de rotación del motor disminuirá. Esto originará un descenso de la fuerza contraelectromotriz (que depende de la velocidad) y un aumento de la corriente del motor. La disminución de la velocidad de rotación continuará hasta que la corriente del inducido, que ha aumentado, cree un nuevo par de arranque igual al par de resistencia incrementado. En lo sucesivo el motor trabajará con una velocidad menor, pero constante. Y al contrario, durante la descarga del motor, su par de arranque será mayor que el par de resistencia, el inducido comenzará a girar más rápidamente, la fuerza contraelectromotriz aumentará y la corriente disminuida del motor creará un par de arranque menor.

§ 146. Regulación de la velocidad de rotación de los motores de corriente continua

Más arriba hemos establecido, que la magnitud de la fuerza contraelectromotriz depende de la velocidad de rotación y de la magnitud del flujo magnético del motor. Esta dependencia se expresa con la fórmula:

$$E = cn\Phi,$$

de donde

$$n = \frac{E}{c\Phi} = \frac{U - I_{ind}R_{ind}}{c\Phi}.$$

Puesto que $I_{ind}R_{ind}$ es muy pequeña (debido a R_{ind}), se puede escribir aproximadamente:

$$n = \frac{U}{c\Phi}.$$

De esta última expresión se deduce que la velocidad de rotación del motor de corriente continua es directamente proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional al flujo magnético.

Cambiando la tensión que se proporciona al motor, así como la corriente de excitación del motor mediante el reóstato regulador intercalado en el circuito de excitación, se puede variar la velocidad de rotación del motor.

§ 147. Reacción del inducido de motores de corriente continua

Durante el trabajo del motor, el campo magnético del inducido actúa sobre el de los polos. Por consiguiente, en los motores, igual que en los generadores, se observa la reacción del inducido (fig. 294). Siendo iguales la dirección de la corriente en el devanado del inducido y la polaridad de los polos, la dirección de rotación del motor es contraria a la del generador. Por eso la reacción del inducido en los motores va acompañada de:

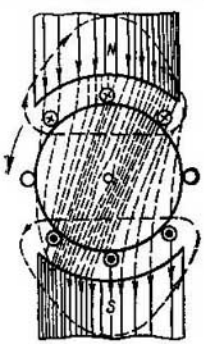


Fig. 294. Reacción del inducido en los motores de corriente continua

1) desmagnetización del extremo de salida y la magnetización del extremo de entrada del polo. Al saturarse el sistema magnético, el flujo magnético resultante disminuye, debido a lo cual la velocidad del motor aumenta en cierto grado;

2) desplazamiento del eje del campo magnético resultante respecto al eje de los polos. La línea neutra física se desplaza en sentido contrario a la rotación del motor en un ángulo, cuya magnitud depende de la carga del motor;

3) que las escobillas, que se instalan en la línea neutra física, también deben ser desplazadas en el colector en dirección contraria a la rotación del motor, a la nueva posición de la línea neutra.

Al pasar la espira del devanado por la línea neutra física, la dirección de la corriente en la espira, con la ayuda del colector, se invierte. Al mismo tiempo la espira del devanado del inducido, que se conmuta, se cortocircuita por las escobillas. El cambio de la corriente en la espira origina una f.e.m. de autoinducción que tiende a retener el cambio de la corriente. Como se ha indicado anteriormente (§ 136), la compensación de la f.e.m. de autoinducción se puede obtener de dos modos: desplazando las escobillas, o sin desplazarlas, por medio

de polos auxiliares. Como ya vimos, en los generadores se hacía necesario desplazar las escobillas en el sentido de rotación del inducido y alojar la espira que se conmuta en el campo de otra polaridad. La disminución de la corriente en la espira del generador, cuando ésta se acerca a la zona de conmutación, origina una f.e.m. de autoinducción dirigida en ese momento en dirección de la corriente o de la f.e.m. inducida de aquella rama paralela en la cual entra la espira dada. Para compensar la f.e.m. de autoinducción es necesario crear, mediante el campo magnético exterior, una f.e.m. dirigida contra la f.e.m. de autoinducción en la espira que se conmuta (o contra la f.e.m. que se induce en aquella rama paralela, en la cual entra la espira dada). Más arriba hemos visto, que la corriente en el devanado del inducido, durante el trabajo del motor, se determina por la fórmula:

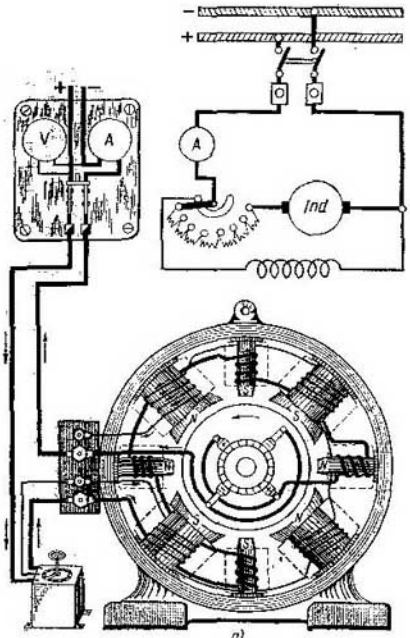
$$I = \frac{U - E}{R_{ind}}.$$

De la fórmula se ve que la dirección de la corriente del inducido se determina por la tensión de la red y es contraria a la de la fuerza contraelectromotriz inducida. En la espira del motor que interseca la línea neutra física, la corriente invierte su dirección. Al disminuir la corriente en la espira, la f.e.m. de autoinducción que surge trata de impedir el cambio de la corriente y está dirigida, en el preciso momento, en el sentido de la corriente o contra la fuerza contraelectromotriz. Para compensar la f.e.m. de autoinducción en esta espira debe ser inducida por medio del campo magnético exterior una f.e.m. que tenga dirección contraria a la f.e.m. de autoinducción o a la corriente, y, por consiguiente, la misma dirección que la fuerza contraelectromotriz. Por eso, para mejorar las condiciones de conmutación, las escobillas de los motores de corriente continua se desplazan en dirección contraria a la rotación del inducido. Para crear una conmutación sin chispas y contrarrestar la reacción del inducido, en los motores se aplican los mismos procedimientos que en los generadores de corriente continua, es decir, polos auxiliares y devanado de compensación. En los motores, a diferencia de los generadores, la sucesión de los polos principales y auxiliares es la siguiente: después del polo principal del motor sigue, en dirección de la rotación del inducido, el polo auxiliar del mismo signo.

Para los motores de alta potencia que trabajan en condiciones difíciles, como, por ejemplo, en elevadores y grúas, en motores de minas y de tracción, de máquinas herramienta, trenes de laminado, etc., se utiliza a veces un devanado de compensación.

§ 148. Motor con excitación en derivación

En la fig. 295 se presenta el esquema de un motor con excitación en derivación, conectado al circuito del inducido mediante un reóstato de arranque. Puesto que el devanado inductor está conectado



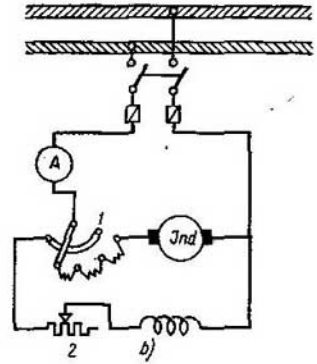


Fig. 295. Motor eléctrico con excitación en derivación:

a — esquema de funcionamiento, *b* — esquema eléctrico de unión y conexión a la red; *1* — reóstato de arranque, *2* — reóstato de regulación

en paralelo a la red, el flujo magnético Φ del motor debe ser constante cuando la resistencia del circuito de excitación y la tensión de la red sean invariables. Anteriormente fue indicado que si despreciamos la caída de tensión en el devanado del inducido, la velocidad del motor de corriente continua dependerá sólo de las magnitudes de la tensión de la red y del flujo magnético. Si éstos son constantes, la velocidad del motor con excitación en derivación no debe variar al cambiar la carga. Pero de la fórmula

$$n = \frac{E}{c\Phi} = \frac{U - I_{ind}R_{ind}}{c\Phi}$$

se ve que la magnitud de la fuerza contraelectromotriz del motor disminuye al aumentar la corriente del inducido, por lo cual la velocidad del motor también disminuye. Además, al aumentar la carga del motor, la reacción del inducido debilita el flujo magnético, lo que lleva a cierto aumento de la velocidad. En la práctica, la caída de tensión en el devanado del inducido se escoge de tal modo que su influencia sobre la velocidad del motor sea casi compensada por la reacción del inducido.

De aquí que la propiedad característica del motor con excitación en derivación consista en una velocidad casi constante de rotación al cambiar la carga en su árbol. Las velocidades en los motores de este tipo, al alcanzar la carga completa suelen disminuir en 3-5%.

El par de arranque es proporcional al producto de la corriente del inducido por la magnitud del flujo magnético:

$$M_{arr} = cI_{ind}\Phi.$$

Sin tomar en consideración la pequeña variación del flujo magnético debida a la reacción del inducido, deducimos que el par de arranque del motor con excitación en derivación, es proporcional a la corriente del inducido:

$$M_{arr} = c_1 I_{ind}.$$

Por consiguiente, gracias al amperímetro intercalado en el circuito del inducido podemos juzgar sobre la carga del motor.

Los motores tendrán la velocidad máxima de rotación durante la marcha en vacío, si la resistencia del reóstato regulador está adicionada totalmente. La apertura del circuito de excitación provocará una disminución del flujo magnético del motor hasta una magnitud insignificante del flujo de magnetismo remanente. Puesto que la fuerza contraelectromotriz ha de ser casi igual a la tensión de la red, al disminuir el flujo magnético, la velocidad de rotación del motor aumentará bruscamente y llegará a ser peligrosa para el motor. Por eso, hace falta controlar el estado del circuito de excitación durante el trabajo del motor.

La regulación de la velocidad de rotación del motor con excitación en derivación se realiza generalmente cambiando el flujo magné-

tico mediante el reóstato regulador en el circuito de excitación. La regulación de la velocidad en algunos motores está en los límites de 1 : 3. El cambio de dirección de rotación de estos motores se realiza cambiando la dirección de la corriente en el devanado inductor de los polos o en el devanado del inducido. Habitualmente el cambio de rotación se efectúa por el segundo método, ya que toda operación con el devanado inductor es peligrosa para el personal e indeseable, porque aparece en él una f.e.m. de autoinducción que puede originar la perforación del aislamiento y la fundición de los contactos.

Los motores con excitación en derivación se emplean en las redes de corriente continua para el accionamiento de las máquinas herramienta, mecanismos (teleféricos, bombas, ventiladores, telares, trenes de laminado, elevadores de minas), que exigen velocidad de rotación constante o amplia regulación de velocidad.

§ 149. Motor con excitación en serie

El esquema de un motor con excitación en serie se muestra en la fig. 296. En motores de este tipo los devanados del inducido e inductor están unidos en serie. Por eso, las corrientes que fluyen por ambos devanados del motor son iguales.

Puesto que con saturaciones pequeñas del acero del conductor magnético del motor el flujo magnético es proporcional a la corriente del inducido:

$$\Phi = c_1 I_{ind},$$

el par de arranque

$$M_{arr} = cI_{ind}\Phi$$

se puede considerar proporcional al cuadrado de la corriente del inducido:

$$M_{arr} = c_2 I_{ind}^2.$$

La dependencia del par de arranque del cuadrado de la corriente en el devanado del inducido permite al motor con excitación en serie aumentar bruscamente su par al aumentar la carga. Esto es particularmente valioso durante la puesta en marcha del motor cuando éste tiene que superar rápidamente la inercia de la carga sobre su árbol.

En los motores con excitación en derivación el par de arranque es proporcional a la primera potencia de la corriente. Por eso, siendo iguales la corriente de arranque y las demás condiciones, el motor con excitación en serie desarrollará un par de arranque mayor que el motor con excitación en derivación.

La velocidad de rotación del motor con excitación en serie varía bruscamente si se aumenta la carga, ya que junto con el cambio de la corriente del inducido cambia el flujo magnético de los polos. De la fórmula

$$n = \frac{U - I_{ind}R_{ind}}{c\Phi}$$

se ve que, cuando la tensión de la red es invariable, la velocidad de rotación del motor es inversamente proporcional a la magnitud del flujo magnético. Por lo tanto, un motor cargado, que consume de la red una gran corriente, tiene considerable flujo magnético y pequeña

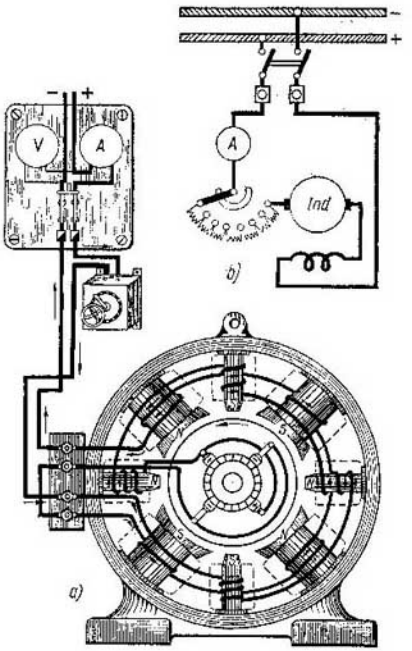


Fig. 296. Motor eléctrico con excitación en serie:
a — esquema de funcionamiento, *b* — esquema eléctrico de unión y conexión a la red

velocidad. Al disminuir la carga sobre el árbol, la corriente del inducido disminuye, el flujo magnético también, y la velocidad de rotación del motor aumenta.

Por eso, si disminuimos considerablemente o quitamos completamente la carga sobre el árbol del motor, la corriente del inducido y el flujo Φ disminuirán bastante y, como se ve de la última fórmula, la velocidad de rotación del motor aumentará hasta una magnitud intolerablemente grande, peligrosa para el motor. Por ese motivo es inadmisible el trabajo del motor en vacío o con pequeña carga,

ya que le amenaza un «embalamiento» debido al aumento excesivo de la velocidad de rotación. Los motores de este tipo no pueden ser acoplados a mecanismos mediante una correa, porque su rotura o desprendimiento llevaría a la descarga y al «embalamiento» del motor.

La regulación de la velocidad de rotación de un motor con excitación en serie se realiza variando la tensión que alimenta el motor o el flujo magnético de los polos. Para regular la velocidad de rotación según el primer método, en el circuito del motor se intercala un reóstato regulador especial (además del de arranque) o se instala un reóstato que pueda servir tanto de arranque como de regulador. Dicho método de regulación no es económico, ya que en los reóstatos se pierde mucha energía en calor. La regulación del flujo magnético de los polos y, al mismo tiempo, de la velocidad de rotación se puede realizar mediante un reóstato conectado en paralelo al devanado inductor del motor. Variando la resistencia del reóstato se puede cambiar la corriente que se deriva al devanado inductor. A veces el devanado inductor del motor se divide en varias secciones y, conectándolas en serie o en paralelo, se varía el flujo magnético del motor. Para el mismo fin, los esquemas de algunos motores permiten desconectar una parte de espiras del devanado inductor. Durante el trabajo conjunto de varios motores con excitación en serie éstos, se conectan en serie o en paralelo para regular la velocidad de los mismos.

Los motores con excitación en serie se utilizan en calidad de motores de tracción en locomotoras eléctricas, en trenes del metropolitano, tranvías, grúas eléctricas, etc.

§ 150. Motor con excitación compuesta

El esquema de un motor con excitación compuesta se da en la fig. 297. La presencia de dos devanados en los polos del motor permite aprovechar las ventajas de los motores de excitación en derivación y en serie. Estas ventajas consisten en la velocidad constante y en un gran par de arranque inicial del motor.

Gracias a la presencia del devanado en derivación, el motor con excitación compuesta no puede embalarse cuando la carga es pequeña o falta totalmente. Los devanados inductores pueden ser conectados de modo que sus flujos magnéticos coincidan en dirección (aditivos) o de modo que los flujos sean contrarios (diferenciales). En caso de conexión de los devanados aditiva, el motor se asemeja por sus propiedades a un motor con excitación en derivación o en serie, lo que dependerá de cuál de los devanados tenga mayor fuerza de magnetización. Al cargar el motor empleando la conexión contraria de los devanados diferenciales, el flujo magnético del devanado en serie aumentando, disminuye el flujo magnético total del motor, mientras que la velocidad del motor aumenta.

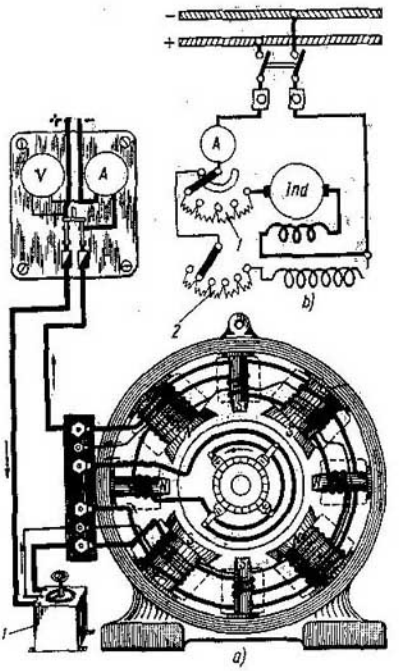


Fig. 297. Motor eléctrico con excitación compuesta:
a — esquema de funcionamiento, *b* — esquema eléctrico de unión y conexión a la red; *1* — reóstato de arranque, *2* — reóstato de regulación

La regulación de la velocidad del motor con excitación compuesta se efectúa mediante un reóstato regulador intercalado en el circuito del devanado inductor en derivación.

§ 151. Convertidores rotatorios

Para transformar la corriente alterna en continua o viceversa son utilizados los convertidores rotatorios.

Se distinguen los siguientes tipos de convertidores:

1) grupos motor-generador (grupo convertidor);
2) conmutatrices;
3) convertidores en cascada.

Además, para transformar (rectificar) la corriente alterna en continua se emplean rectificadores que estudiaremos en el capítulo XIII.

El **grupo motor-generador** (fig. 298) consta de dos máquinas separadas, motor y generador, unidas entre sí con una transmisión de correa o acopladas con un manguito en un árbol común. Si el grupo convertidor sirve para transformar la corriente alterna en continua, como motor se utiliza un motor asincrónico o sincrónico, y como generador, uno de corriente continua con excitación independiente o con autoexcitación.

Calculemos el rendimiento total de la instalación:
designemos con P_1 la potencia que el motor consume de la red, y con P_2 la potencia en el árbol del motor. Entonces el rendimiento del motor será:

$$\eta_m = \frac{P_2}{P_1},$$

de donde

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_m};$$

designemos con P_3 la potencia que recibe el generador, y con P_4 la potencia que entrega el generador. Entonces el rendimiento del generador será:

$$\eta_g = \frac{P_4}{P_3},$$

de donde

$$P_4 = \eta_g P_3.$$

El rendimiento total de la instalación

$$\eta = \frac{P_4}{P_1} = \frac{\eta_g P_3 \eta_m}{P_2}.$$

Si las máquinas están dispuestas sobre un mismo árbol, se puede considerar que $P_2 = P_3$; por eso, definitivamente, tendremos:

$$\eta = \eta_m \eta_g.$$

En caso de que ambas máquinas estén unidas mediante una transmisión de correa o por cualquier otro método, el rendimiento de la transmisión, $\eta_t = \frac{P_3}{P_2}$, y el rendimiento total son iguales al producto de los rendimientos del motor, de la transmisión y del generador:

$$\eta = \eta_m \eta_t \eta_g.$$

En el grupo motor-generador la tensión de la corriente continua no depende de la tensión de la corriente alterna.

La **conmutatriz** es un generador de corriente continua, en el cual, además del colector, hay también anillos colectores. La transformación de una clase de corriente en otra tiene lugar sólo en el inducido. Por eso, entre las tensiones de la corriente alterna y la continua existe una dependencia determinada. En la fig. 299 se muestra el esquema de una conmutatriz para transformar la corriente alterna

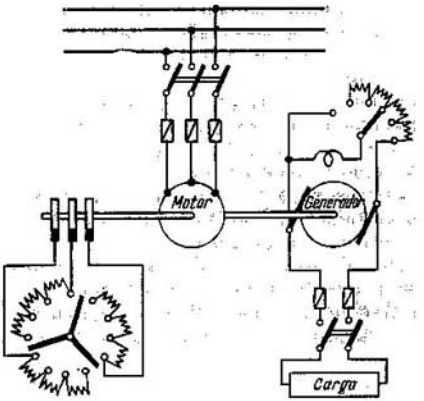


Fig. 298. Esquema de un grupo convertidor

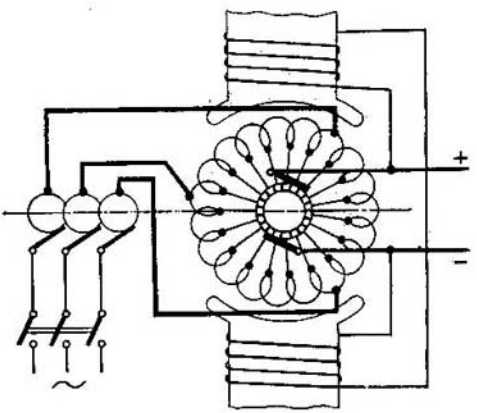


Fig. 299. Esquema de una conmutatriz (trifásica)

trifásica en continua. El devanado del inducido está conectado por uno de los lados de la máquina con el colector. Tres puntos del devanado del inducido dispuestos a 120° (para una máquina bipolar) están conectados a tres anillos colectores fijados al árbol, en el lado contrario de la máquina.

Para transformar la corriente alterna monofásica en continua se emplean convertidores en los que, además del colector, están dispuestos sobre el árbol dos anillos colectores unidos a dos puntos diametralmente opuestos del devanado del inducido.

Las conmutatrices para transformar la corriente alterna hexafásica en continua tienen seis anillos colectores. La excitación de la conmutatriz se verifica por medio de la corriente continua. El flujo magnético que crea el devanado inductor de los polos es común para las f.e.m. de las corrientes continua y alterna que se inducen en el inducido del convertidor. Más arriba fue señalado, que entre las tensiones de las corrientes alterna y continua existe una dependencia determinada.

Sin acudir a cálculos matemáticos citemos varias cifras:

$U_{alt} = 0{,}72\ U_{cont}$ para corriente monofásica;
$U_{alt} = 0{,}62\ U_{cont}$ para corriente trifásica;
$U_{alt} = 0{,}354\ U_{cont}$ para corriente hexafásica.

De estos datos se deduce, que la tensión de la corriente continua siempre es mayor que la de la corriente alterna.

Los cálculos muestran que los convertidores hexafásicos son los más económicos, los cuales, teniendo el mismo peso, desarrollan una potencia mayor que los de corriente trifásica y monofásica.

El arranque del convertidor se puede efectuar de tres modos:

1) por corriente continua;
2) por corriente alterna;
3) mediante un motor de arranque.

El arranque del convertidor por medio de la corriente continua es posible si hay una fuente independiente de ésta. El convertidor se pone en marcha como motor de corriente continua. El convertidor se sincroniza con la red por medio de corriente alterna, y se conecta el interruptor de cuchilla de la red. Después, se desconecta la fuente de arranque de corriente continua y se conecta la carga al convertidor.

El arranque por corriente alterna se realiza cerrando el interruptor de cuchilla de la corriente trifásica. El devanado del inducido crea un campo magnético giratorio, el cual intersecando el devanado en cortocircuito alojado en los terminales polares, induce en éste una corriente. Como resultado de la interacción de las corrientes inducidas y del campo magnético giratorio, el inducido del convertidor comienza a girar. El flujo magnético de los polos surge según el mismo principio que en los generadores con autoexcitación. El convertidor puesto en marcha como motor asincrónico, cuando existe un campo

magnético constante, entra en sincronismo y funciona como motor sincrónico.

La puesta en marcha del convertidor mediante un motor de arranque no necesita explicación especial.

El **convertidor en cascada** consta de un motor asincrónico y de una conmutatriz. Ambas máquinas están montadas sobre un árbol. El circuito del rotor del motor asincrónico se une en serie ó en cascada con el inducido del convertidor.

El convertidor en cascada con corriente alterna funciona en el régimen de motor sincrónico y transforma la potencia de deslizamiento que recibe del rotor del motor asincrónico en potencia de corriente continua.

Preguntas de control

1. Enumérense las partes principales de una máquina de corriente continua e indíquense su aplicación.
2. ¿Cuál es la estructura y empleo del colector en los generadores de corriente continua?
3. ¿Qué tipos de devanados del inducido existen?
4. ¿Qué es reacción del inducido? ¿Qué modificaciones tienen lugar en el generador (motor) durante el trabajo debido a la acción de la reacción del inducido?
5. ¿Qué es la conmutación y cuáles son las condiciones para una conmutación ideal?
6. ¿Cuáles son las medidas para luchar contra la reacción del inducido?
7. ¿A qué medidas se recurre para mejorar las condiciones de conmutación en las máquinas de corriente continua?
8. ¿Cuál es la estructura de un generador con excitación independiente? Indíquense sus propiedades, ventajas, deficiencias.
9. Lo mismo para un generador con excitación en derivación.
10. Lo mismo para un generador con excitación en serie.
11. Lo mismo para un generador con excitación compuesta.
12. ¿Cómo se conecta un generador con excitación en derivación para trabajo en paralelo?
13. ¿Por qué no se puede conectar un motor de corriente continua a la red sin reóstato de arranque?
14. ¿Cómo se puede regular la velocidad de rotación de un motor de corriente continua?
15. ¿Cuál es la estructura de un motor con excitación en derivación? Indíquense sus propiedades, ventajas, inconvenientes.
16. Lo mismo para un motor con excitación en serie.
17. Lo mismo para un motor con excitación compuesta.

XIII

RECTIFICADORES

§ 152. Nociones generales sobre rectificadores

Existen diversas ramas de la técnica que necesitan corriente continua. Galvanoplastia, galvanostegia, refinación de metales, carga de acumuladores, transporte eléctrico, obtención de campos magnéticos, he aquí algunas de las esferas donde la corriente mencionada ha encontrado una aplicación extraordinaria.

La corriente continua se puede obtener de generadores de corriente continua, acumuladores y pilas eléctricas. Generalmente, al consumidor le es proporcionada corriente alterna producida por generadores instalados en centrales eléctricas. Esta corriente alterna es transformada en continua según las necesidades.

Antes, para transformar la corriente alterna en continua se empleaban grupos convertidores que constaban de un motor de corriente alterna, al que se le acoplaba un generador de corriente continua. El motor se alimentaba de la red de corriente alterna y hacía girar el generador. El último generaba la corriente continua. Ahora los grupos convertidores se emplean raras veces, utilizándose generalmente aparatos especiales que transforman la corriente alterna en continua y que se denominan r e c t i f i c a d o r e s.

En la técnica dos tipos de rectificadores han alcanzado un amplio empleo: 1) los rectificadores metálicos y 2) los rectificadores de vapor de mercurio. A continuación estudiaremos con mayor detalle estos dos tipos de rectificadores.

Los r e c t i f i c a d o r e s m e t á l i c o s son aquellos cuyas partes están hechas de metales. En la técnica han encontrado difusión los siguientes rectificadores metálicos: a) de óxido de cobre y b) de selenio.

Los r e c t i f i c a d o r e s d e v a p o r d e m e r c u r i o se dividen en los de ampolla de vidrio y los de tanque de acero.

Además de rectificadores metálicos y de vapor de mercurio existen también rectificadores mecánicos, kenotrones (válvulas rectificadoras), rectificadores a gas y electrolíticos. Los kenotrones se emplean ampliamente en radiotecnia; se instalan en la mayoría de

los radiorreceptores modernos que se alimentan de redes de corriente alterna, en los aparatos de rayos X, etc. Los a gas se utilizan para templar metales por alta frecuencia, etc.

§ 153. Rectificadores de óxido de cobre

La construcción de un elemento rectificador de óxido de cobre se muestra en la fig. 300. Un disco de cobre *1* sirve de electrodo. Sobre el disco hay una capa de óxido cuproso *2*.

Para obtener en el disco de cobre la capa de óxido (Cu_2O), el disco se calienta hasta una temperatura alta y después se enfría rápidamente en agua fría.

Si ajustamos a la superficie de la capa de óxido cuproso una placa metálica *3*, ésta servirá de segundo electrodo. Para el segundo electrodo se usa habitualmente una placa de plomo que asegura un buen contacto gracias a su plasticidad.

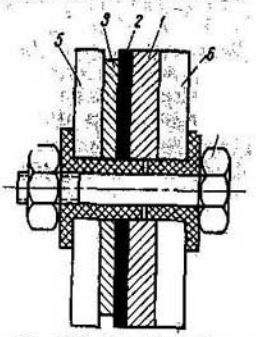


Fig. 300. Estructura de un elemento del rectificador de óxido de cobre

En la frontera entre el conductor (cobre) y el semiconductor (óxido cuproso) surge una capa finísima de orden de unas cienmilésimas de milímetro que posee gran resistencia. Esta capa se denomina capa barrera o capa de bloqueo.

De este modo, el rectificador consta de tres capas: primera, el metal, que dispone de gran concentración de electrones libres; segunda, la barrera, que no tiene electrones libres; y tercera, el semiconductor, que dispone de pequeña cantidad de electrones libres. Cuando en las capas exteriores existe una diferencia de potencial, en la capa barrera surge un fuerte campo eléctrico que favorece la atracción de electrones libres de las capas próximas. Si comunicamos al cobre un potencial negativo y al óxido cuproso uno positivo, la cantidad de electrones libres extraídos del cobre será grande y pasará una corriente eléctrica desde el óxido cuproso hacia el cobre. Con la polaridad inversa, la cantidad de electrones arrancados al óxido cuproso será muy pequeña y prácticamente la corriente no pasará por el circuito.

El paso de la corriente en un solo sentido a través del sistema de óxido cuproso — cobre puede ser aprovechado para rectificar la corriente alterna.

Cuando el rectificador se monta, sus diferentes elementos se ponen sobre un perno aislado *4* y se aprietan entre arandelas de latón *5* y *6*.

A cada uno de los elementos del rectificador puede ser aplicada una tensión no mayor de 4 a 8 V. Si la tensión es mayor, las placas

se conectan en serie. La densidad máxima de la corriente de los rectificadores de óxido cuproso es de 0,1 a 1,15 A/cm², siendo la tensión tolerable hasta de 8 V en la capa rectificadora. Cuando las corrientes son mayores se aumentan las dimensiones de las placas o éstas se unen en paralelo.

Para evacuar el calor, entre las arandelas se colocan radiadores en forma de aletas metálicas de gran diámetro.

El plazo de servicio de los rectificadores de óxido cuproso es de 12 a 15 años; el rendimiento, cerca del 70%.

Los rectificadores de óxido cuproso se emplean para alimentar los circuitos de señalamiento ferroviario; en la radiotecnia, para cargar acumuladores, alimentar los aparatos eléctricos de medición de sistema detector, que permiten a los aparatos magnetoeléctricos medir corrientes alternas y tensiones, etc.

§ 154. Rectificadores de selenio

El selenio (Se) es un elemento químico que se encuentra en la naturaleza en estado libre, en yacimientos de azufre. En la industria, el selenio se obtiene como subproducto de la producción de ácido sulfúrico, así como de los sedimentos (lodos) durante la afinación electrolítica del cobre. En estado normal el selenio es una substancia sólida, de color gris, con temperatura de fusión de 220°C y peso específico de 4,8. El selenio tiene la propiedad de cambiar su conductividad en función de la iluminación. En esto se funda su empleo en células fotoeléctricas.

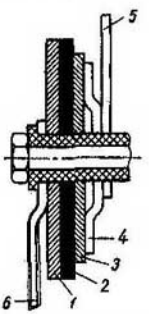


Fig. 301. Estructura de un elemento del rectificador de selenio

En la fig. 301 se muestra un elemento del rectificador de selenio. Aquí uno de los electrodos es una arandela de hierro niquelada *1* con una capa fina de selenio *2* aplicada sobre ella. El segundo electrodo es una capa *3* de una aleación especial de bismuto, estaño y cadmio (Bi, Sn, Cd) espolvoreada sobre el selenio que es un buen conductor. A esta capa revestidora se le fija la arandela de contacto de latón *4*. Para conectar el elemento a la red se usan las placas *5* y *6* que están en contacto con ambos electrodos. En los límites de las capas revestidora y de selenio surge una capa aislante cuya función se da en la descripción de los rectificadores de óxido cuproso.

La densidad tolerable de la corriente del rectificador de selenio es de 0,2 a 0,3 A/cm². La tensión para un elemento no debe ser mayor de 16 a 18 V (según el diámetro de las arandelas), el rendimiento, cerca de 80%.

Los rectificadores de selenio se emplean para los mismos fines que los de óxido cuproso, excepto los aparatos eléctricos detectores, donde no se emplean, debido a la inestabilidad de sus características.

§ 155. Rectificador semiconductor de germanio

Después de la segunda guerra mundial han adquirido gran importancia práctica los rectificadores de germanio y silicio.

Los rectificadores de silicio y germanio no gastan energía para la incandescencia del filamento, necesaria en las válvulas electrónicas; son insensibles a sacudidas; de sencilla fabricación; tienen pequeñas dimensiones (varios milímetros), gran plazo de servicio, y funcionan sin fallas. Si el rendimiento de los rectificadores de óxido de cobre no supera el 70 ó 75%, y el de los de selenio es de cerca del 80%, el rendimiento de los rectificadores de germanio supera el 95% y la densidad de corriente en éstos es muchas veces mayor que en los de óxido de cobre y de selenio. Los aparatos de germanio y silicio se

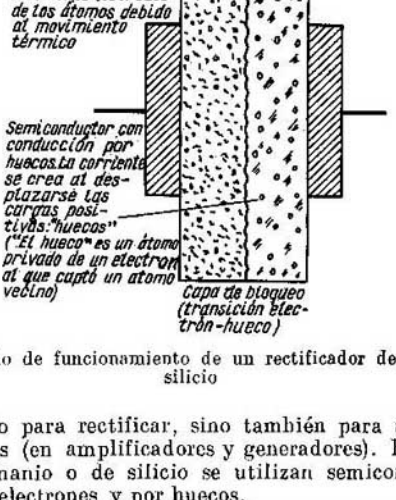


Fig. 302. Principio de funcionamiento de un rectificador de germanio o de silicio

emplean no sólo para rectificar, sino también para amplificar las radiooscilaciones (en amplificadores y generadores). En los rectificadores de germanio o de silicio se utilizan semiconductores con conducción por electrones y por huecos.

Como se ha indicado anteriormente, la pertenencia de un conductor o de un semiconductor a tal o cual tipo de conducción se determina ante todo por las impurezas que éstos casi siempre contienen. Si las impurezas entregan fácilmente electrones, el material pertenece

a los conductores o semiconductores con conducción electrónica. Pero si éstas absorben electrones, el material tiene conducción por huecos. En los límites de los diferentes tipos de semiconductores en contacto (por electrones y huecos) se forma una capa de bloqueo que deja pasar la corriente sólo en una dirección (fig. 302). En esta propiedad de los semiconductores se funda la acción de estos rectificadores. Los rectificadores semiconductores sencillos y compactos sustituyen con éxito los complejos rectificadores de vapor de mercurio, grupos convertidores y válvulas electrónicas rectificadoras que se

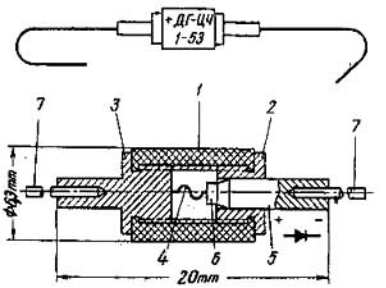


Fig. 303. Estructura de un rectificador de germanio y su aspecto exterior: *1* — cartucho cerámico, *2*, *3* — púas inferior y superior del detector, *4* — muelle de contacto, *5* — portacristal, *6* — placa de germanio, *7* — terminales de alambre

emplean para transformar la corriente alterna en continua. El germanio y silicio son los elementos más adecuados para fabricar rectificadores. El tipo de su conducción depende de las impurezas (por ejemplo, de indio).

El germanio es un elemento químico, con símbolo Ge, número atómico 32, peso atómico 72,6; es un metal frágil, de color blanco grisáceo, por sus propiedades se aproxima al estaño; de peso específico 5,4, temperatura de fusión 959°C. El silicio es un elemento químico con símbolo Si, número atómico 14, peso atómico 28,06; es un no metal, uno de los principales componentes de la corteza terrestre, piedras, arena, vidrio, etc., su peso específico es 2,6-2,7, su temperatura de fusión, 1.450°C. El indio es un elemento químico raro, con símbolo In, número atómico 49, peso atómico 114,76; es un metal blanco, blando, de peso específico 7,3 y temperatura de fusión cerca de 1.500°C.

La fig. 303 representa el aspecto exterior y la sección de un rectificador semiconductor de germanio (diodo) que se emplea en radiotecnia para rectificar corrientes de alta frecuencia.

La corriente se rectifica en el punto donde el muelle de contacto (conducción por electrones) toca la placa de germanio (conducción por huecos). La pequeña capacidad y dimensiones reducidas de este

rectificador han permitido emplearlo en la radiotecnia. Pero las corrientes rectificadas por diodos de contacto puntual son pequeñas. Los rectificadores potentes tienen grandes superficies.

§ 156. Esquema de conexión de rectificadores metálicos

En la fig. 304 se muestra cómo se representan los rectificadores en los esquemas eléctricos; la punta de la flecha indica la dirección de la corriente.

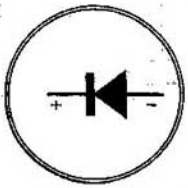


Fig. 304. Designación convencional de los rectificadores en los esquemas eléctricos

Para rectificar la corriente alterna monofásica en continua se puede utilizar el esquema expuesto en la fig. 305. La parte inferior de la sinusoide de corriente alterna es cortada por el rectificador y, después de la rectificación en el circuito, fluye una corriente pulsatoria

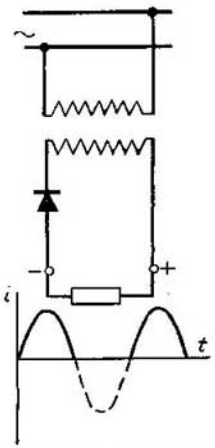


Fig. 305. Esquema de rectificación de media onda de la corriente alterna monofásica

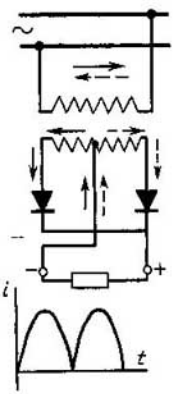


Fig. 306. Esquema de rectificación de onda completa de la corriente alterna monofásica

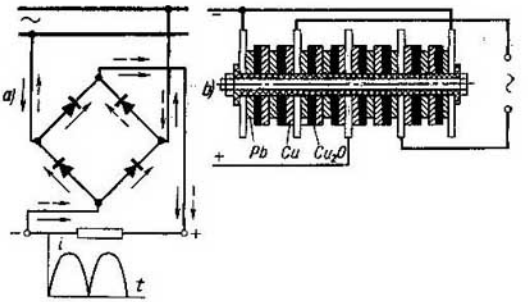


Fig. 307. Esquema de conexión de un puente de cuatro elementos del rectificador:
a — rectificador de onda completa, b — rectificador montado de varios elementos según este esquema

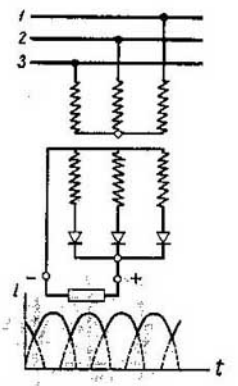


Fig. 308. Esquema de rectificación de la corriente alterna trifásica

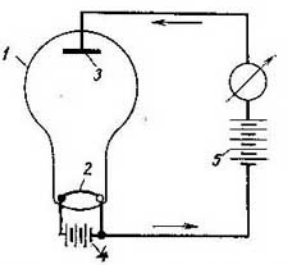


Fig. 309. Principio de funcionamiento de un kenotrón

con intervalo de un semiperíodo. Esto es lo que se llama esquema de rectificación de media onda.

En la fig. 306 está representado el esquema de rectificación de una corriente monofásica, usando el punto neutro del devanado secundario del transformador. Con flechas continuas se indica el recorrido de la corriente durante un semiperíodo, con flechas punteadas, durante el otro. En el circuito exterior pasa una corriente pulsatoria. Pero a diferencia del esquema anterior, aquí la corriente no se interrumpe, ya que se utilizan las dos mitades de la sinusoide de corriente alterna. Este es el denominado esquema de rectificación de onda completa.

En la fig. 307 se muestra el esquema de un puente de cuatro rectificadores que permite emplear las dos mitades de la sinusoide de corriente alterna, es decir, es también un esquema de rectificación de onda completa. El recorrido de la corriente durante el primer semiperíodo se indica con flechas continuas, y durante el segundo semiperíodo, con flechas punteadas. La conexión verdadera de los rectificadores de acuerdo con el esquema de principio (fig. 307,*a*) se muestra en la fig. 307,*b*.

El esquema de rectificación de la corriente alterna trifásica se muestra en la fig. 308.

§ 157. Kenotrón (válvula rectificadora)

En la fig. 309 está representada una ampolla de vidrio *1* en la que se ha practicado un alto grado de vacío (hasta 0,0000001 mm de mercurio). El aire se extrae de la ampolla mediante bombas especiales de vapor de mercurio, después de lo cual los residuos del gas se desalojan con un calentamiento minucioso de la ampolla. Una vez alcanzado tan alto vacío se puede considerar prácticamente que el espacio en el interior de la ampolla no contiene gas. En la parte inferior de la ampolla está dispuesto el cátodo *2*; en la parte superior, el ánodo *3*. El cátodo es un filamento de un metal poco fusible (tántalo, molibdeno, tungsteno) y está conectado a una batería de acumuladores de calentamiento *4* o, a otra fuente de corriente eléctrica de 4 a 6 V de tensión. La batería de calentamiento junto con el filamento forman el circuito catódico.

Hemos visto que en los metales hay electrones libres en gran cantidad. A la temperatura ambiente la energía cinética de los electrones libres es tan pequeña que no son capaces de abandonar la superficie del metal. Pero si calentamos el metal hasta una temperatura alta, la velocidad de los electrones libres y su energía cinética crecerán, y el metal calentado comenzará a desprender electrones. Este fenómeno se llama e m i s i ó n t e r m o i ó n i c a.

El filamento del cátodo, o filamento de calentamiento, calentado por la corriente eléctrica de la batería, emite electrones que, agrupándose junto al filamento, forman una «nube» electrónica que impi-

de la salida ulterior de electrones de la superficie del filamento. Si conectamos la otra batería de acumuladores 5 (batería anódica) de 80 a 100 V de tensión, de modo que el «positivo» de la batería esté conectado con el segundo electrodo, ánodo, y el «negativo» con el cátodo, en el interior de la ampolla de vidrio, entre el filamento de calentamiento y el ánodo, se formará un campo eléctrico.

Los electrones que emite el filamento de calentamiento, bajo la acción de fuerzas eléctricas del campo, se pondrán en movimiento, dirigiéndose hacia el ánodo. Del ánodo los electrones pasarán por el circuito exterior a través de la batería anódica al cátodo. En el circuito se establecerá una corriente eléctrica cuya dirección dentro de la ampolla de vidrio será desde el ánodo hacia el cátodo. El recorrido de la corriente desde el cátodo, por el circuito exterior, hasta el ánodo, se denomina circuito anódico.

Al aumentar la tensión de la batería anódica crece la corriente anódica. Esto se explica por el hecho de que, al aumentar el potencial del ánodo, una cantidad cada vez mayor de electrones alcanzará el ánodo. Finalmente, con cierto potencial del ánodo, la corriente en el circuito anódico no aumentará más. La máxima corriente anódica para un calentamiento dado del cátodo se denomina c o r r i e n t e d e s a t u r a c i ó n. El número de electrones que emite un cátodo calentado depende del área del cátodo y de la temperatura de su calentamiento. La temperatura del filamento catódico de tungsteno suele alcanzar de 2.300° a 2.500°C. El aumento del calor en el filamento de tungsteno, a mayor temperatura que la citada, conduce al incremento de la potencia que se gasta en el calentamiento del filamento, así como a una disminución brusca del plazo de servicio del cátodo.

Se han experimentado filamentos de diversos materiales para hallar aquel que pueda dar mayor corriente de saturación a más baja temperatura. Se ha descubierto que la adición de óxido de torio al tungsteno aumenta considerablemente la corriente de emisión. Actualmente los cátodos con torio se preparan de tungsteno, en cuya superficie lleva aplicada, de un modo especial, una capa muy fina de torio. Estos cátodos se calientan habitualmente hasta 1.600-1.850°C. Las investigaciones han demostrado también que los óxidos de metales alcalino-térreos (bario, calcio, estroncio), calentados inclusive hasta 1.000°C, generan un flujo electrónico muy grande.

Los filamentos catódicos metálicos (de níquel) cubiertos de una capa de óxido de metales alcalino-térreos se llaman c á t o d o s d e ó x i d o. La temperatura de trabajo de tales filamentos es de 900° a 1.200°C.

Los electrones emitidos por el filamento catódico se dirigen, bajo la acción del campo eléctrico, hacia el ánodo y, a medida que se van acercando a éste, su velocidad aumenta. Chocando contra la superficie del ánodo, los electrones entregan su energía cinética, originando el calentamiento de la placa anódica. El níquel o el molibdeno

se emplean habitualmente como material para la preparación del ánodo.

Si cambiamos la conexión de la batería anódica de modo que el ánodo de la ampolla esté unido al «negativo» de la batería, los electrones emitidos por el cátodo se repelerán por el ánodo cargado con electricidad del mismo signo, y no habrá corriente en el circuito anódico. Por consiguiente, la corriente en el circuito del ánodo puede pasar solamente en una dirección: desde el ánodo hacia el cátodo, es decir, cuando el ánodo está cargado positivamente respecto al cátodo. Esta propiedad de la válvula electrónica, de dejar pasar la corriente sólo en una dirección, se utiliza para rectificar la corriente alterna. Aplicando al circuito del ánodo una tensión alterna, obtendremos en el circuito anódico de la válvula una corriente pulsatoria rectificada. La válvula que se emplea para este fin se denomina k e n o t r ó n.

El la fig. 310 se muestra el esquema de conexión de un kenotrón. El defecto de dicho esquema consiste en que se utiliza solamente una semionda de la corriente, por lo cual ha recibido la denominación de esquema de r e c t i f i c a c i ó n d e m e d i a o n d a. Para utilizar la corriente durante todo el período, se usan esquemas con rectificación de onda completa. En la fig. 311 se da un esquema de dos kenotrones, y en la fig. 312, de un kenotrón con dos ánodos. En el último esquema, el cátodo se alimenta con corriente alterna de un devanado especial del transformador. Para nivelar las pulsaciones de la corriente rectificada se emplean filtros que constan de condensadores y bobinas de inducción (choques).

La corriente pulsatoria rectificada puede considerarse formada por dos componentes: continua y alterna. Para la componente continua de la corriente, los condensadores representan una resistencia muy alta, y al contrario, las bobinas, que no disponen de resistencia inductiva para la corriente continua, le ofrecen la posibilidad de pasar libremente a través del filtro. Para la componente alterna de la corriente los condensadores representan una resistencia muy baja y, al contrario, las bobinas de inducción representan una resistencia grande.

La disposición de los condensadores y de las bobinas de inducción, como se muestra en la fig. 312, da la posibilidad a la componente alterna de la corriente de pasar libremente a través de los condensadores evitando los consumidores. Al mismo tiempo, la componente continua de la corriente, pasando libremente a través de las bobinas de inducción, se dirige al circuito del consumidor.

De este modo, al circuito del consumidor prácticamente pasa sólo la corriente continua.

En el esquema con dos kenotrones o con un kenotrón de dos ánodos, la corriente pasará a través del ánodo, el cual, en el momento dado, es positivo respecto al cátodo. El punto medio del devanado del transformador que proporciona tensión a los ánodos del

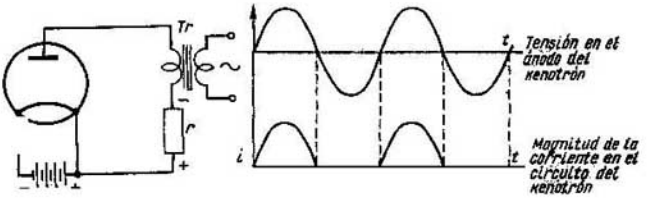


Fig. 310. Esquema de conexión de un kenotrón

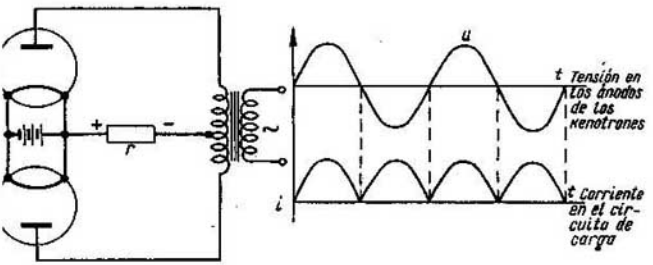


Fig. 311. Esquema de conexión de dos kenotrones

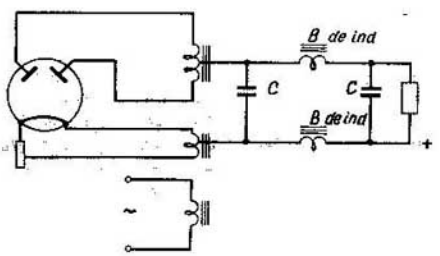


Fig. 312. Esquema de un kenotrón bianódico

kenotrón sirve de «menos» en el circuito de corriente continua. El punto medio del devanado de calentamiento del cátodo sirve de «más» en el circuito de corriente continua. Los kenotrones se emplean en los radiorreceptores de red, aparatos para comprobación de cables, aparatos de rayos X, etc.

§ 158. Rectificadores de vapor de mercurio de ampolla de vidrio

La acción de un rectificador de vapor de mercurio se funda en la propiedad unilateral de un arco eléctrico, que surge en un recipiente con mercurio donde se ha practicado el vacío, de dejar pasar la corriente solamente en una dirección. El elemento rectificador ofrece

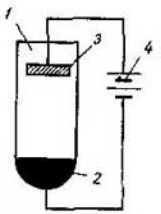


Fig. 313. Estructura de un rectificador de vapor de mercurio de ampolla de vidrio

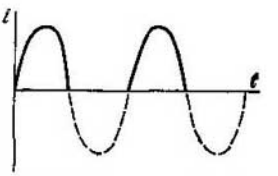


Fig. 314. Corriente rectificada en el circuito de un rectificador de vapor de mercurio

pequeña resistencia para la corriente de sentido directo y gran resistencia para la corriente de sentido contrario.

Los rectificadores de vapor de mercurio suelen ser de ampolla de vidrio, de recipiente metálico y de vidrio y metal conjuntamente.

Estudiemos la estructura de un rectificador de vapor de mercurio de ampolla de vidrio y su funcionamiento. La ampolla de vidrio *1* (fig. 313) contiene mercurio *2*. En su parte superior lleva soldado un electrodo de carbón *3*. El aire ha sido extraído de la ampolla y la misma está soldada.

Si conectamos la batería de acumuladores *4* de manera que el polo positivo de la batería esté conectado al electrodo de carbón (ánodo) y el polo negativo al mercurio (cátodo), entre el ánodo y el cátodo surgirá un campo eléctrico.

El mercurio se evapora, inclusive a una temperatura ambiente de la superficie del cátodo y sus vapores llenan la ampolla. Si mediante un dispositivo especial creamos un arco en la ampolla, de la base incandescente del arco, en la superficie del mercurio, de la llamada mancha catódica, comienzan a salir electrones que se dirigirán bajo la acción del campo eléctrico hacia el ánodo. En su camino los electrones chocarán contra las moléculas neutras de los vapores de

mercurio. Se verifica la ionización por choque, debido a lo cual se forman iones positivos y negativos.

La ionización de los vapores de mercurio va acompañada de la aparición de una luminiscencia intensa de color violeta en la ampolla del rectificador. En el circuito comienza a fluir una corriente eléctrica. Los electrones junto con los iones negativos de mercurio se mueven hacia el ánodo. Al mismo tiempo, los iones positivos atraídos por el cátodo chocan contra la superficie del mercurio, formando la mancha catódica incandescente mencionada. El campo magnético creado por las cargas positivas de los iones contribuye a desprender los electrones de la superficie del mercurio y a la formación del flujo de electrones.

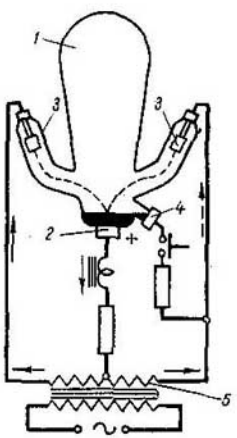


Fig. 315. Esquema de conexión de un rectificador bianódico de vapor de mercurio al circuito de corriente alterna monofásica

Los vapores de mercurio, al tocar las paredes frías de la ampolla de vidrio, se condensan en gotas que se deslizan hacia abajo.

Si cambiamos la conexión de la batería de modo que al electrodo de carbón *3* sea conectado el «negativo» de la batería, y al electrodo de mercurio *2*, el «positivo» de la misma, en las mismas condiciones (presencia de la mancha catódica en el cátodo) la corriente no podrá pasar por el circuito. La ampolla con mercurio conectada al circuito de corriente alterna deja pasar la corriente solamente en una dirección y transforma la corriente alterna en pulsatoria.

En la fig. 314 se muestra la curva de una corriente alterna monofásica. Si cada media onda superior de la sinusoide corresponde a la dirección de la corriente desde el electrodo frío hacia el caliente, la corriente pasará por el circuito sólo en los instantes que corresponden a esta media onda. Cada semionda negativa de la sinusoide resultará cortada y la corriente no pasará en los instantes que corresponden a esta semionda. De este modo en el circuito tendremos una corriente pulsatoria.

Para evitar la interrupción de la corriente, los rectificadores de vapor de mercurio monofásicos se fabrican con dos ánodos. En la fig. 315 se da el esquema de conexión de un rectificador de vapor de mercurio de dos ánodos al circuito de corriente alterna monofásica. Tales rectificadores se hacen para una corriente de hasta 50 A y de 500 V de tensión. De la ampolla de vidrio *1* se ha extraído el aire y el espacio está lleno de vapores de mercurio a una presión de 0,001 a 0,05 mm de mercurio. En la parte inferior de la ampolla se encuen-

tra el mercurio líquido, en cuyo interior entra una barra de molibdeno *2* soldada dentro del vidrio de la ampolla. Dos ánodos de grafito *3* están dispuestos en las barras-soportes del ánodo, brazos de la ampolla. Para hacer surgir el arco, se instala un electrodo de encendido *4* con una pequeña cantidad de mercurio.

Para poner en funcionamiento el rectificador se aprieta el botón en el circuito de encendido y la ampolla de vidrio se inclina de manera que el mercurio del electrodo de encendido *4* se una con el del

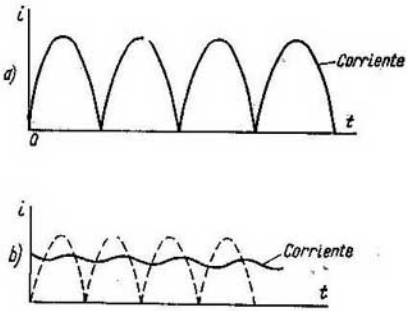


Fig. 316. Curvas de la corriente rectificada por un rectificador bianódico conectado a la red de corriente monofásica:
a — sin bobina de inducción, *b* — con bobina de inducción

cátodo *2*. Al volver la ampolla a la posición inicial la continuidad del mercurio se interrumpe y en el lugar de la interrupción surge un arco eléctrico cuya base en el mercurio del cátodo es precisamente la mancha catódica mencionada más arriba. Los electrones, saliendo de la superficie de la mancha catódica, se dirigen hacia los ánodos principales. Conectando la resistencia del consumidor al cátodo de la ampolla del rectificador (el «positivo» de la red exterior) y al punto neutro del transformador *5* (el «negativo» de la red exterior) obtendremos una corriente rectificada.

Las flechas indican la dirección de esta corriente: las continuas, de la semionda positiva de la corriente alterna; las punteadas, de la semionda negativa.

En la fig. 316,*a*, se ve que en determinados instantes la corriente rectificada llega a ser igual a cero. En dichos momentos puede apagarse el arco en el rectificador y habrá que encenderlo de nuevo. Para nivelar las pulsaciones de la corriente se conecta una bobina de inducción en el circuito del rectificador. En la fig. 316,*b* se muestra la curva de la corriente rectificada en un circuito con bobina.

A una temperatura alta del ánodo, éste también comienza a emitir electrones y el rectificador dejará pasar ambas semiondas de la

sinusoide de la corriente alterna. Este fenómeno se denomina **retroceso del arco**. Esto puede ocurrir en caso de enfriamiento deficiente del rectificador de sobrecarga y de presencia de gases extraños en la ampolla. El retroceso del arco va acompañado por cortocircuito del devanado secundario del transformador de alimentación. Para proteger el rectificador de la acción de cortocircuito se instalan dispositivos automáticos especiales de funcionamiento rápido, los cuales al aparecer el retroceso del arco desconectan el rectificador.

A veces las ampollas tienen cuatro ánodos en cuatro brazos (fig. 317, a la izquierda). Tales rectificadores se emplean para alimentar dos circuitos distintos con tensiones diferentes

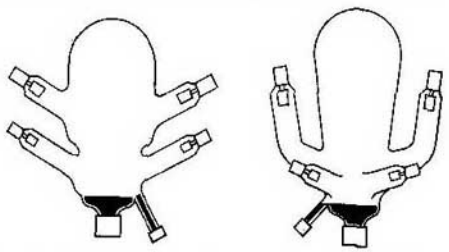


Fig. 317. Rectificadores de vapor de mercurio: a la izquierda, con cuatro ánodos; a la derecha, con excitación independiente

Para rectificar las corrientes de alta tensión se emplean rectificadores con ánodos instalados en brazos altos de vidrio. Los rectificadores de alto voltaje se fabrican para tensiones de 3.000 y 10.000 V.

Si la corriente en el circuito disminuye bruscamente o cesa, el arco eléctrico en la ampolla puede apagarse y hay que encenderlo de nuevo. Para evitar eso se utilizan rectificadores con excitación independiente. En la fig. 317, a la derecha, se muestra la ampolla de un rectificador de mercurio con excitación independiente. Los ánodos de excitación independiente (cuyo número suele ser dos) se alimentan de un transformador independiente. Su finalidad es mantener el arco eléctrico cuando la corriente rectificada disminuye bruscamente o cesa por completo.

Los rectificadores de vapor de mercurio de bajo voltaje, desde 20 A, así como los de alto voltaje se construyen con enfriamiento artificial mediante un ventilador eléctrico.

Para transformar la corriente alterna trifásica en continua se emplean rectificadores de vapor de mercurio trifásicos (fig. 318). Los ánodos principales del rectificador se alimentan de un transformador trifásico. El punto neutro del transformador es el polo negativo de la red de corriente continua. El cátodo de la ampolla del rectificador es el polo positivo de la red de corriente continua. Los ánodos

de excitación independiente se alimentan de un transformador independiente T_{exc}, a través de las inductancias L_1 y L_2. La resistencia sirve para limitar la corriente en el circuito de encendido. El ventilador eléctrico para enfriar la ampolla se conecta simultáneamente con el transformador.

Al rectificar la corriente trifásica las curvas de la corriente rectificada se superponen una a otra y las pulsaciones se hacen menores

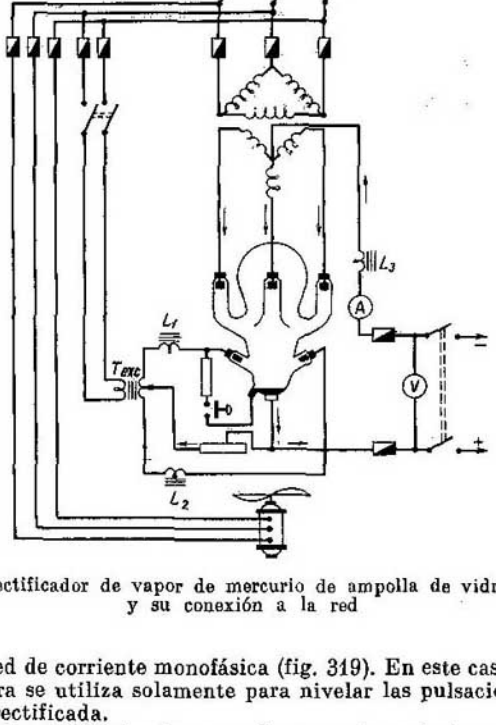


Fig. 318. Rectificador de vapor de mercurio de ampolla de vidrio trifásico y su conexión a la red

que en la red de corriente monofásica (fig. 319). En este caso la bobina inductora se utiliza solamente para nivelar las pulsaciones de la corriente rectificada.

El tipo de rectificador de vapor de mercurio se designa con siglas y cifras. La letra *B* indica la ampolla del rectificador; la cifra delante de la letra *B* indica el número de ánodos de servicio en la ampolla. La letra *H* indica la excitación independiente. La cifra que está detrás de las letras indica la corriente máxima rectificada tolerable, en amperios.

En los rectificadores de alto voltaje se indica después de la corriente, la magnitud de la tensión de trabajo rectificada, en voltios.

Ejemplos: 2B-12: ampolla de un rectificador de vapor de mercurio con dos ánodos de servicio para 12 A de corriente rectificada.

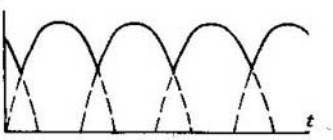


Fig. 319. Curvas de la corriente trifásica rectificada

4B-6: ampolla de un rectificador de vapor de mercurio con cuatro ánodos de servicio para 6 A de corriente rectificada.

3BH-6-10.000: ampolla de un rectificador de vapor de mercurio con tres ánodos de servicio, de excitación independiente, para 6 A de corriente rectificada y la tensión límite de 10.000 V.

Los rectificadores de vapor de mercurio tienen una pequeña caída de tensión en el arco. Esta varía, dependiendo de la estructura del rectificador, en 16 y 25 V. Debido a la pequeña caída de tensión, los rectificadores de vapor de mercurio tienen alto rendimiento (hasta un 86 %).

Los rectificadores de vapor de mercurio de ampolla de vidrio se emplean para cargar baterías de acumuladores, alimentar los arcos eléctricos en aparatos cinematográficos, redes de fuerza y de alumbrado de corriente continua, electrólisis, alimentar circuitos operativos de corriente continua de instrumentos eléctricos, etc.

§ 159. Rectificadores de vapor de mercurio de tanque metálico

Para corrientes superiores a 500 A se emplean rectificadores de vapor de mercurio de tanque metálico.

En la fig. 320 se muestra el esquema de un rectificador de vapor de mercurio de tanque metálico. El tanque metálico del rectificador *1* está refrigerado por agua. La cubeta catódica *2*, aislada del cuerpo, contiene mercurio. Los ánodos principales *3* pasan a través de brazos anódicos *4*, que protegen los ánodos del vapor de mercurio que se condensa. En el interior del rectificador están alojados el electrodo de encendido *5* y los ánodos de excitación independiente *6*. El extremo superior del electrodo de encendido está fijo al núcleo de acero colocado en el solenoide. Si cerramos el circuito de la corriente que alimenta el solenoide, el núcleo es atraído y hace descender el electrodo de encendido, que se sumerge por breve tiempo en el mercurio, y después regresa a la posición anterior bajo la acción del muelle. El arco que surge entre el electrodo de encendido y el

mercurio pasa a los ánodos de excitación que lo sostienen sin permitirle que se extinga.

En los lugares de conexión de las partes del rectificador se colocan empaquetaduras que aseguran el mantenimiento de vacío en el interior del rectificador. Puesto que la seguridad del servicio del rectificador depende ante todo del vacío en su cuba, los rectificadores metálicos se equipan con bombas para mantener constantemente un alto vacío.

La tensión rectificada en los rectificadores se regula mediante un transformador de secciones o autotransformador que dispone de varias derivaciones en sus devanados. Variando la magnitud de la tensión de la corriente alterna que alimenta el rectificador se cambia la magnitud de la tensión rectificada.

Se fabrican también rectificadores en los cuales la regulación de la tensión rectificada se efectúa por medio de rejillas de control 7 (fig. 320) dispuestas delante de los ánodos principales.

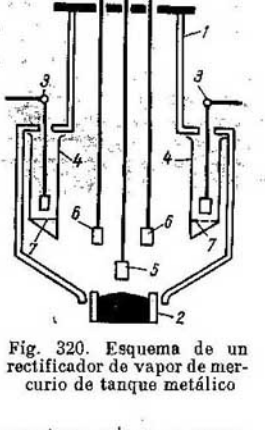


Fig. 320. Esquema de un rectificador de vapor de mercurio de tanque metálico

Los rectificadores de vapor de mercurio de tanque metálico que funcionan en las redes de corriente trifásica se hacen con tres, seis y, a veces, doce ánodos principales. La alimentación de los ánodos de los rectificadores multifásicos se realiza de un transformador, cuyo devanado secundario da una corriente de seis o doce fases, gracias a la debida conexión de sus partes.

En la fig. 321, *a* y *b* se muestran los esquemas de funcionamiento de los rectificadores de vapor de mercurio trifásico y hexafásico.

Si todos los ánodos principales están dispuestos en una cuba, los rectificadores se denominan polianódicos. Pero si cada ánodo está alojado en una cuba independiente, el rectificador se denomina monoanódico.

Ahora en la URSS se fabrican rectificadores polianódicos PMHB-500 y PMHB-1.000, y monoanódicos, PMHB-500 × 6, PMHB-1.000 × 6, PMHB-500 × 12 y PMHB-1.000 × 12.

El tipo PMHB significa: P, de mercurio; M, metálico; H, con bombas para mantener el vacío; B, con refrigeración por agua. El número después de las siglas indica la corriente tolerable del elemento rectificador a la tensión de 600 V, y el segundo número, la cantidad de elementos rectificadores en el equipo.

Los rectificadores monoanódicos tienen las siguientes ventajas con respecto a los polianódicos: 1) posibilidad de emplear transformadores trifásicos corrientes en vez de monofásicos especiales al aplicar

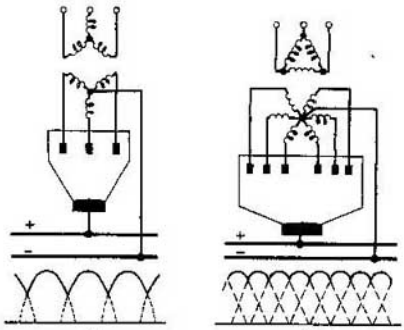


Fig. 321. Esquema de funcionamiento de un rectificador de vapor de mercurio de tanque metálico:
a — para la corriente trifásica, *b* — para la corriente hexafásica

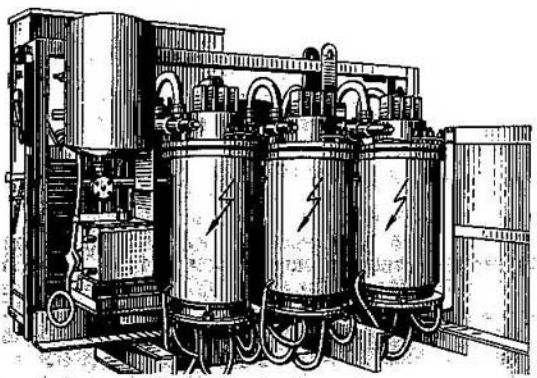


Fig. 322. Aspecto exterior del rectificador monoanódico PMHB-500 × 6

la conexión en puente de rectificación; 2) menor caída de tensión en el arco del rectificador; 3) distribución de los arcos de los diferentes ánodos por distintos cuerpos con vacío; 4) dimensiones reducidas; 5) rendimiento más alto; 6) mejores condiciones de refrigeración.

En las subestaciones alimentadores del transporte urbano electrificado (tranvía, trolebús, metropolitano), así como en las subestaciones alimentadoras de ferrocarriles eléctricos suburbanos y magistrales, el rectificador más utilizado es el PMHB-500 × 6 (figs. 322 y 323). Dicho rectificador consta de seis elementos rectificadores de mercurio montados sobre un bastidor común. Cada elemento se comunica a través de una llave de vacío con un tubo común de vacío. Una de las condiciones principales para un trabajo seguro del rectificador de vapor de mercurio es la creación y mantenimiento en éste del vacío correspondiente. El personal de turno que sirve los rectificadores de vapor de mercurio tiene que mantener en el cuerpo del rectificador una presión de 0,1 a 0,5 micrones de mercurio (1 micrón = 0,001 mm). El aire y los gases, que se forman durante su funcionamiento y que penetran en el rectificador a través de las empaquetaduras son absorbidos por dos bombas: la de vapor de mercurio y la de vacío previo. La bomba de vapor de mercurio está acoplada al tubo común de vacío, a través del cual, desde la cuba del rectificador, los vestigios de aire y gases se impelen al recipiente de vacío previo, de donde se expulsan a la atmósfera mediante una bomba. Para medir la presión de los gases en el cuerpo del rectificador se utilizan manómetros de mercurio.

Los aparatos para encender y excitar el rectificador, así como para alimentar las rejillas de control se colocan en la caja de mando del rectificador (IIIPB).

La refrigeración de los rectificadores polianódicos se efectúa con agua corriente por un sistema de circulación abierta. Con mangueras de goma, el agua se suministra al rectificador, baña las paredes de la cuba y se vierte en la canalización.

La refrigeración de los rectificadores monoanódicos se realiza con agua destilada por un sistema de circulación cerrada. Una bomba centrífuga impele el agua destilada, la cual se calienta al absorber el calor de las ampollas del rectificador, y va al serpentín donde se enfría con agua corriente. El agua destilada enfriada en el serpentín se suministra de nuevo para refrigerar el rectificador.

Los rectificadores de vapor de mercurio de tanque metálico proporcionan energía eléctrica de corriente continua de 600 V de tensión (para tranvías y trolebuses), de 750 V (para el tren subterráneo) y de 1.500 V y 3.000 V para ferrocarriles suburbanos y magistrales electrificadas.

Preguntas de control

1. ¿Para qué sirven los rectificadores y qué tipos de éstos existen?
2. ¿Cuál es la construcción de los rectificadores de óxido de cobre, cuál es el principio de su funcionamiento y dónde se aplican?

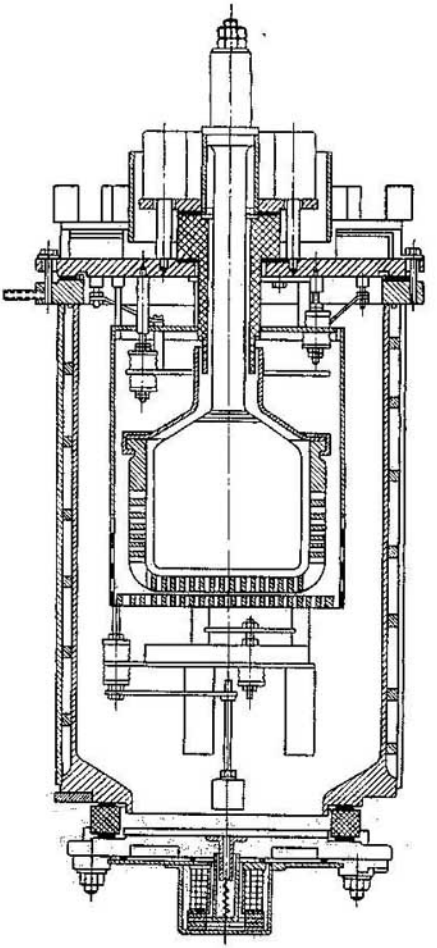


Fig. 323. Sección transversal de un elemento rectificador monoanódico de rectificador PMHB-500 × 6

3. ¿Cuál es la estructura de los rectificadores de selenio, el principio de su funcionamiento y dónde se aplican?

4. ¿Cuál es la estructura de los rectificadores de germanio (silicio) y qué ventajas tienen en comparación con los de óxido de cobre y de selenio?

5. ¿Cuál es el principio de funcionamiento de los rectificadores de vapor de mercurio?

6. ¿Qué medidas se adoptan para nivelar las pulsaciones de la corriente rectificada en los rectificadores de vapor de mercurio?

7. ¿Cuál es la estructura de los rectificadores de vapor de mercurio de tanque de acero y dónde se aplican?

8. ¿Cuál es la diferencia entre los rectificadores de vapor de mercurio polianódicos y monoanódicos?

XIV

INSTRUMENTOS ELECTRICOS DE MEDICION Y TECNICA DE MEDICIONES ELECTRICAS

§ 160. Consideraciones generales sobre instrumentos de medición eléctricos

Si para determinar el tiempo se emplea el reloj, para medir longitudes, áreas y volúmenes se emplean medidas lineales, cuadradas y cúbicas correspondientes, así, para medir magnitudes eléctricas se usan instrumentos eléctricos especiales. Los instrumentos eléctricos de medición han encontrado amplia aplicación para el uso racional, control y protección de instalaciones eléctricas.

En los instrumentos eléctricos de medición se distinguen las partes móviles y fijas. En los diferentes modos de manifestarse la corriente eléctrica, por ejemplo, en los fenómenos térmicos, magnéticos y mecánicos se basan las acciones recíprocas de las partes móvil y fija del instrumento. El par de arranque que surge a consecuencia de esto hace girar la parte móvil del instrumento junto con el indicador (la aguja).

Bajo la acción del par de arranque el sistema móvil gira en un ángulo tanto mayor cuanto mayor es la magnitud a medir. Para contrarrestar el par de arranque hace falta crear un par igual y opuesto en dirección, ya que en caso contrario, con cualesquiera de los valores que se mida (excepto cero), la aguja se inclinará hasta el tope de la escala.

Generalmente el par antagónico se crea mediante muelles en espiral de bronce al fósforo.

Como es sabido, el rozamiento siempre está dirigido contra el movimiento. Por eso, durante el giro de la parte móvil, el rozamiento frenará el movimiento y alterará las indicaciones del instrumento. Para disminuir el rozamiento, en algunas construcciones, la parte móvil se fija sobre pivotes de piedras de alta dureza (rubí, zafiro, ágata). En la fig. 324 se muestra el esquema del eje y de los pivotes de instrumentos eléctricos de medición. Para proteger los pivotes contra el deterioro durante su transporte, algunos instrumentos tienen un dispositivo que se denomina m e c a n i s m o d e s u j e c i ó n que levanta la parte móvil y la inmoviliza.

El par de frenado del instrumento cambia por diversas causas. Por ejemplo, a diferentes temperaturas, los muelles espirales tienen



Fig 324. Esquema del eje y del pivote de un instrumento eléctrico de medición

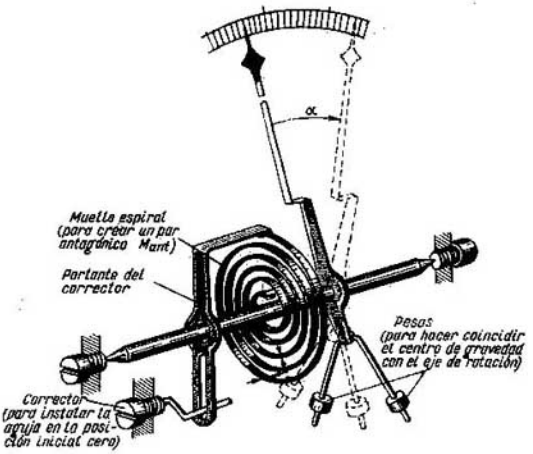


Fig. 325. Esquema de las partes móviles de un instrumento eléctrico de medición con corrector

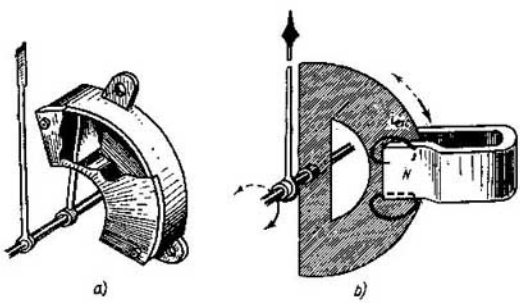


Fig. 326. Diseño de amortiguadores:
a—de aire, b—electromagnético

distinta elasticidad. En este caso la aguja del instrumento se apartará de la división cero. Para establecer la aguja en posición cero se emplea un dispositivo denominado c o r r e c t o r. En la fig. 325 se muestra el esquema de la parte móvil de un instrumento eléctrico de medición con el corrector. El mecanismo medidor del instrumento está encerrado en un cuerpo que lo protege de la acción mecánica y de la ponetración de polvo, agua y gases.

Una de las condiciones que se exige del instrumento es el amortiguamiento rápido de las oscilaciones de su parte móvil, lo cual se logra mediante la aplicación de amortiguadores que aprovechan la resistencia mecánica del medio ambiente (aire, aceite) o el frenado electromagnético. En la fig. 326 se muestran las estructuras de amortiguadores de aire y electromagnético.

La máxima magnitud que se puede indicar directamente en la escala del instrumento se llama i n d i c a c i ó n n o m i n a l del instrumento. Al realizar mediciones eléctricas la indicación del instrumento debe diferenciarse del valor real de la magnitud que se mide. La diferencia entre la indicación del instrumento y el valor real de la magnitud que se mide se denomina error absoluto. Así, por ejemplo, si el amperímetro ha indicado el valor de una corriente igual a 5 A, pero su valor real, medido con un amperímetro patrón, es igual a 4,9 A, el e r r o r a b s o l u t o es de 5—4,9 = 0,1 A. Conociendo el error absoluto del instrumento se puede introducir la corrección durante las mediciones y obtener el valor real de la magnitud que se mide.

La relación entre el error absoluto y el valor real de la magnitud se llama e r r o r r e l a t i v o. En el ejemplo citado más arriba, error relativo es igual a

$$0{,}1/4{,}9 = 0{,}02 \text{ ó } 2\%$$

La precisión del instrumento se caracteriza por el error reducido principal. El error reducido es la relación entre el error absoluto y la indicación nominal del instrumento. El error reducido del instrumento, determinado en condiciones normales (posición normal de la escala, temperatura normal de 20°C, ausencia de campos magnéticos exteriores y de grandes masas ferromagnéticas junto al instrumento), se denomina e r r o r r e d u c i d o p r i n c i p a l. La sensibilidad del instrumento se caracteriza por la magnitud del ángulo de desviación de la parte móvil al medir una magnitud eléctrica determinada. El instrumento eléctrico de medición conectado a la red no debe cambiar el régimen de trabajo de ésta y por eso su propio consumo de potencia ha de ser mínimo.

Las consideraciones principales que se han de tomar al elegir un instrumento son: 1) seguridad en el empleo, 2) sencillez en el manejo del instrumento, 3) precisión, 4) gasto propio de potencia, 5) forma exterior, 6) peso, 7) costo.

§ 161. Clasificación de instrumentos eléctricos de medición

Los instrumentos eléctricos de medición se diferencian según las particularidades siguientes:

1) la magnitud a medir;
2) tipo de corriente;
3) grado de precisión;
4) principio de funcionamiento;
5) modo de obtener la lectura;
6) carácter de aplicación.

Además de las particularidades mencionadas, los instrumentos eléctricos de medición pueden distinguirse por:

1) el modo de montaje;
2) modo de protección contra los campos magnéticos y eléctricos exteriores;
3) resistencia a las sobrecargas;
4) posibilidad de emplearlos a distintas temperaturas;
5) dimensiones exteriores y otras particularidades.

A continuación estudiaremos las principales particularidades de los instrumentos.

Para medir las magnitudes eléctricas se emplean diferentes instrumentos eléctricos de medición, a saber: la intensidad de la corriente, el amperímetro; la tensión, el voltímetro; la resistencia eléctrica, el ohmetro y puentes de resistencias; la potencia, el vatímetro; la energía eléctrica, el contador; la frecuencia de corriente alterna, el frecuencímetro; factor de potencia, el fasímetro.

Según sea la corriente, los instrumentos se clasifican en instrumentos de corriente continua, de corriente alterna y de ambas corrientes. Según el grado de precisión los instrumentos se dividen en siete clases: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5, y 4. La cifra indica el valor del error reducido principal en tanto por ciento.

Según su funcionamiento, los instrumentos se dividen en magnetoeléctricos, electromagnéticos, electrodinámicos (ferrodinámicos), inductivos, térmicos, de resonancia, termoeléctricos, de detección, etc.

Según el modo de obtener la lectura, los instrumentos pueden ser con lectura directa y registradores.

Por el carácter de aplicación, los instrumentos se dividen en estacionarios, portátiles y para instalaciones ambulantes.

§ 162. Instrumentos magnetoeléctricos de medición

Los instrumentos magnetoeléctricos funcionan basándose en la acción recíproca entre una bobina con corriente y el campo de un imán permanente. En la fig. 327 se muestra la estructura de un instrumento de dicho sistema. Un potente imán permanente *1* en forma

de U, hecho de acero a cobalto, tungsteno o níquel y aluminio (alnico), crea un campo magnético. En los extremos del imán están unidas piezas polares *2* de acero dulce, que tienen muescas cilíndricas. Entre las piezas polares se ha fijado un cilindro de acero *3*, que sirve para disminuir la resistencia del circuito magnético.

Además, el cilindro juega también otro papel. Las líneas magnéticas salen de las piezas polares, y debido a que la permeabilidad magnética del acero es considerablemente mayor que la del aire, entran en dirección radial en el cilindro, formando en el entrehierro un campo magnético prácticamente homogéneo. Un campo semejante se crea a la salida de las líneas magnéticas del cilindro. El cilindro está envuelto por un cuadro ligero de aluminio *4* con un devanado arrollado (bobina) *5* hecho de alambre de cobre aislado. El marco está asentado sobre el eje *6* que se apoya en los pivotes *7*. En el eje se fija también la aguja de aluminio *8*. El par antagónico se crea por dos muelles planos en espiral *9* que sirven al mismo tiempo para suministrar corriente al devanado del instrumento.

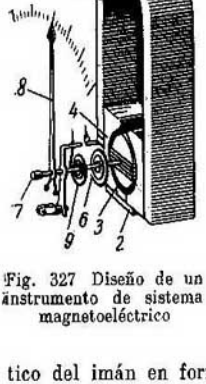


Fig. 327 Diseño de un instrumento de sistema magnetoeléctrico

Los bornes del instrumento se montan en la parte exterior y se unen mediante conductores a los muelles en espiral.

Al pasar la corriente por las espiras del devanado, debido a la interacción de la corriente en los conductores y del campo magnético del imán en forma de herradura, surge una fuerza mecánica cuya dirección se puede determinar por la «regla de la mano izquierda». En el otro lado del devanado surge una fuerza igual en magnitud, pero de dirección contraria. Se forma un par de fuerzas. Bajo la acción de este par de fuerzas la bobina girará. La fuerza de interacción depende de la magnitud de inducción magnética B, de la corriente I en la bobina, del número de espiras w de la bobina y de la longitud activa l de la bobina:

$$F = BIlw.$$

Las oscilaciones del cuadro de aluminio con el devanado en el campo magnético provocan la aparición de una corriente inducida en el cuadro que se opondrá a estas oscilaciones y, de tal modo, contribuirá al amortiguamiento de la parte móvil del instrumento. La invariabilidad de la inducción en todos los puntos del entrehierro asegura la proporcionalidad entre la corriente en el devanado y el ángulo de giro de la parte móvil, debido a lo cual la escala del instrumento es graduada uniformemente.

Los instrumentos magnetoeléctricos son los más sensibles y precisos de todos los instrumentos existentes con lectura directa. Estos se fabrican tanto en modelo de instrumentos de laboratorio multilímite, de clase de precisión de 0,1 a 0,5, como en modelo de instrumentos técnicos de clase 1 y 1,5.

Los instrumentos magnetoeléctricos, teniendo alta precisión, gran sensibilidad, escala uniforme, pequeño consumo de energía (de 0,5 a 3 W), poca sensibilidad a los campos magnéticos exteriores y rápido amortiguamiento han encontrado amplia aplicación en los circuitos de corriente continua en calidad de amperímetros, voltímetros, miliamperímetros, milivoltímetros, etc.

Entre las deficiencias de los instrumentos de dicho sistema se cuentan: su alto precio, su sensibilidad a las sobrecargas y aplicación solamente para corriente continua. Efectivamente, al dejar pasar la corriente alterna por el devanado, la parte móvil del instrumento debería desviarse, tanto en uno, como en otro sentido. Pero, debido a las variaciones rápidas de la corriente en la bobina, la parte móvil, bajo la inercia, no podrá seguirlas y la aguja del instrumento quedará inmóvil.

Para medir pequeñas magnitudes de carga, corriente y tensión se utilizan galvanómetros, que preferentemente han obtenido aplicación para métodos de mediciones nulos, cuando es necesario revelar la ausencia de corriente en tal o cual parte del esquema de medición.

Para mediciones con corriente continua se emplean casi exclusivamente los galvanómetros magnetoeléctricos.

El principio de funcionamiento y la estructura de los galvanómetros magnetoeléctricos son los mismos que los de otros instrumentos de este sistema. Sin embargo, en los galvanómetros se han tomado medidas para disminuir el peso de la parte móvil del instrumento y del rozamiento. La bobina de gran número de espiras (el cuadro) de los galvanómetros se hace de conductor aislado. Para comunicarle rigidez se impregna de barniz de devanado. El cuadro tiene los así llamados hilos con par cero para suministrar corriente a éste.

En los galvanómetros (microamperímetros) de precisión aproximada la parte móvil está instalada sobre ejes y pivotes. Los galvanómetros de alta sensibilidad tienen un cuadro suspendido sobre hilos largos de bronce al fósforo o sobre tirantes. El cuadro del galvanómetro de alta sensibilidad está dotado de un espejo. Un rayo de luz es enviado de una fuente especial de luz hacia el espejo y, reflejándose desde éste, cae sobre la escala instalada a distancia determinada del galvanómetro.

Los galvanómetros pueden medir directamente corrientes desde 10^{-6} hasta 10^{-12} A.

§ 163. Instrumentos electromagnéticos de medición

El funcionamiento de los instrumentos electromagnéticos de medición se basa en el principio de interacción entre la corriente de la bobina y el campo magnético de un núcleo móvil de material ferromagnético. Según su estructura los instrumentos electromagnéticos se dividen en dos tipos: con bobina plana y con bobina circular. Estudiemos la estructura del primer tipo de instrumentos (fig. 328).

El devanado del instrumento es una bobina plana *1* con fisura. En los voltímetros el devanado de la bobina se hace de alambre fino de cobre (de 0,05 a 0,1 mm de diámetro) con gran número de espiras

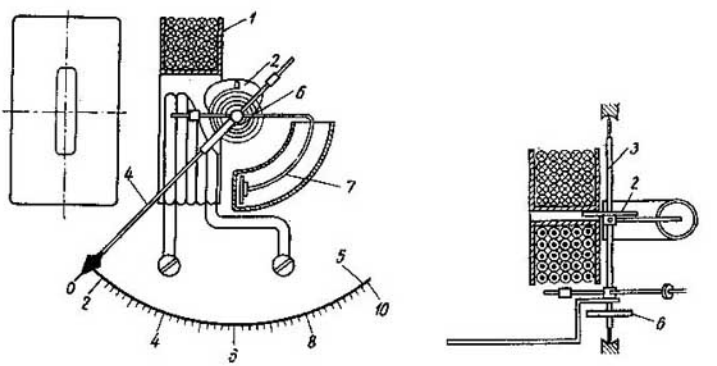


Fig. 328. Esquema de un instrumento de sistema electromagnético con bobina plana

(de 2.000 a 10.000). El devanado de los amperímetros para corrientes de hasta 30 A se hace de un número pequeño de espiras de alambre grueso. Para corrientes de hasta 200 A el devanado se prepara de cinta de cobre o en forma de una espira de barra (para corrientes de 300 a 500 A). La segunda parte principal del instrumento es el núcleo de material ferromagnético (por ejemplo, de permalloy) en forma de hoja *2*, fijado excéntricamente sobre el eje del instrumento *3*. Al pasar la corriente por las espiras de la bobina surge un campo magnético, el cual atrae el núcleo a la fisura tanto más cuanto mayor es la corriente que pasa por las espiras de la bobina. La aguja *4* fijada en el eje se desplazará por la escala *5*. El par antagónico es creado por el muelle espiral *6* unido por un extremo con el eje y, por el otro, con la parte fija del instrumento. Para amortiguar los instrumentos electromagnéticos se utilizan generalmente amortiguadores de aire *7*. El émbolo del amortiguador, fijado en el eje mediante alambre, desplazándose en un cilindro curvo experimenta, por parte del aire

en el cilindro, una resistencia a sus oscilaciones, lo que lleva al amortiguamiento de la aguja. La variación de la magnitud de la corriente en la bobina origina un cambio no proporcional del ángulo de giro de la aguja, puesto que el par de arranque que actúa sobre el sistema móvil depende del cuadrado de la corriente. Por eso, la escala de un instrumento electromagnético no es uniforme.

La estructura de un instrumento con bobina circular se muestra en la fig. 329. La corriente, al pasar por las espiras de la bobina *1*, crea un campo magnético y magnetiza dos núcleos de hierro: el núcleo *2* sujeto firmemente a la parte interior de la bobina, y el otro *3*, fijado en el eje del instrumento. Los bordes próximos de los núcleos se magnetizan, adquiriendo la misma polaridad, y, por consiguiente, el núcleo *3*, repeliéndose del núcleo *2*, hará girar el eje del instrumento.

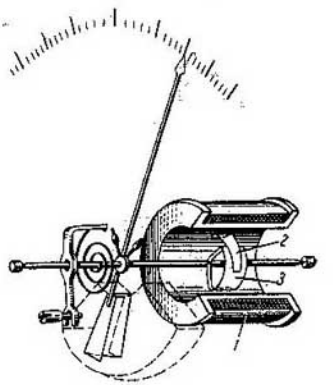


Fig. 329. Instrumento de sistema electromagnético con bobina circular

Los campos magnéticos exteriores influyen en el funcionamiento del instrumento electromagnético, pero la cubierta de hierro del mismo atenúa considerablemente esta influencia. El cambio de la dirección de la corriente en el devanado lleva a la remagnetización del núcleo (o núcleos) y la fuerza de interacción no cambia su dirección. Por eso los instrumentos electromagnéticos pueden funcionar en circuitos de corrientes continua y alterna. En caso de corriente alterna el instrumento indicará el valor eficaz de la corriente o de la tensión. El consumo de potencia en los amperímetros constituye de 2 a 8 W y en los voltímetros de 5 a 6 W. La sencillez de la estructura, su bajo costo, la facultad de resistir sobrecargas, su aplicación tanto para corriente continua como para alterna, han llevado a la amplia utilización de los instrumentos del sistema electromagnético para mediciones técnicas. Entre los inconvenientes del instrumento conviene citar: su pequeña precisión, escala no uniforme, dependencia de las indicaciones del instrumento de los campos magnéticos exteriores y de la frecuencia. Los instrumentos electromagnéticos se fabrican principalmente como instrumentos técnicos de tableros con clases de precisión de 1; 1,5; 2,5.

Dando una forma especial al núcleo y cambiando su posición respecto a la bobina, se puede lograr cierta disminución de la falta de uniformidad de la escala en estos instrumentos.

§ 164. Instrumentos electrodinámicos de medición

El principio de funcionamiento de los instrumentos electrodinámicos se funda en la acción mutua de los campos magnéticos de dos bobinas: una, sujeta firmemente, y otra, asentada sobre el eje y capaz de girar. En la fig. 330 se muestra la estructura del instrumento electrodinámico. La bobina *1* (en el caso dado consta de dos mitades) está sujeta firmemente. A la bobina móvil *2*, fijada sobre el eje del instrumento *3*, se le suministra la corriente a través de muelles espirales *4*, que al mismo tiempo sirven para crear un par antagónico. Al pasar la corriente por las espiras de ambas bobinas, éstas crearán campos magnéticos, los cuales interactuando tratarán de hacer girar la bobina *2* de modo que su campo magnético y el de la bobina *1* coincidan en dirección. Hay instrumentos en los cuales las bobinas no son circulares, sino rectangulares. El campo magnético de cada bobina depende de la corriente, por eso, la fuerza de interacción de ambas bobinas es proporcional al cuadrado de la corriente. Por consiguiente, la escala del instrumento no es lineal. El amortiguamiento de los instrumentos de este sistema es aéreo, porque si se utilizara un freno electromagnético provocaría la alteración de las indicaciones del instrumento.

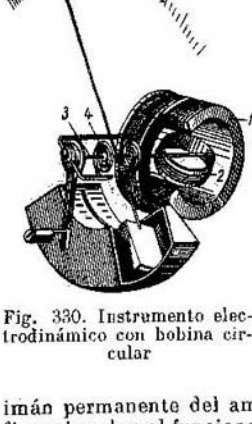


Fig. 330. Instrumento electrodinámico con bobina circular

Esto se explica por el hecho de que los propios campos magnéticos de las bobinas son muy débiles y el potente campo del imán permanente del amortiguamiento electromagnético ejercería influencia sobre el funcionamiento del instrumento. El cambio simultáneo de dirección de la corriente en ambas bobinas no varía el sentido de la fuerza de interacción. Por eso los instrumentos electrodinámicos se emplean en los circuitos tanto de corriente continua como en los de alterna. En los circuitos de corriente alterna los instrumentos de este sistema indican el valor eficaz de la magnitud que se mide. La precisión de los instrumentos electrodinámicos es grande (clase de precisión: de 0,2 a 0,5), y por consiguiente, se emplean como instrumentos de control para mediciones con corriente alterna. Entre sus desventajas hay que mencionar el gasto considerable de potencia, que alcanza en los amperímetros de 5 a 10 W, y en los voltímetros es de 7 a 15 W, sensibilidad a las sobrecargas e influencia de campos magnéticos exteriores sobre las indicaciones del instrumento, debido a que su campo propio es débil. En caso de sobrecargas del instrumento, los muelles espirales pierden su elasticidad y pueden fundirse.

Otra variedad de instrumentos electrodinámicos son los ferrodinámicos (fig. 331). La bobina fija *1* se arrolla en la culata *2* de chapas de acero electrotécnico. En el interior de la bobina móvil *3* está fijado el cilindro de acero *4*. La bobina móvil gira alrededor de un núcleo cilíndrico. La intensificación del campo magnético del instrumento lleva al aumento del par de arranque y a la disminución de la influencia de los campos magnéticos exteriores. Pero la presencia de hierro tiene también influencia negativa, ya que surgen errores complementarios (por ejemplo, pérdidas en histéresis y corrientes parásitas en sistemas de corriente alterna). La precisión de los instrumentos ferrodinámicos es menor que la de los electrodinámicos. Gracias al considerable par de arranque, los instrumentos de dicho sistema se emplean frecuentemente como registradores. La aguja de estos instrumentos está equipada con una punta que presiona sobre una cinta de papel, la cual se desplaza por medio de un mecanismo de reloj. La aguja con punta traza sobre el papel curvas de las variaciones de la corriente, tensión, potencia, etc.

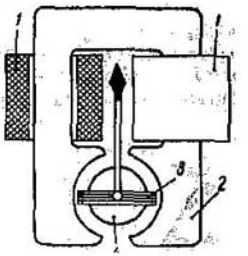


Fig. 331. Esquema de un instrumento ferrodinámico

§ 165. Instrumentos térmicos de medición

El principio de funcionamiento de los instrumentos térmicos está basado en la dilatación de un hilo metálico al ser calentado por una corriente, dilatación que se transforma más tarde en movimiento giratorio de la parte móvil del instrumento. En la fig. 332 está expuesta la estructura de un instrumento térmico. Entre los puntos A_1 y A_2 está tendido un hilo metálico *1*, de 100 a 160 mm de longitud y de 0,03 a 0,05 mm de diámetro, hecho de una aleación de platino con iridio (o plata). En el punto *B* el hilo de platino e iridio se tensa por otro hilo metálico *2* (puente), cuyo otro extremo está fijado en el punto *C*. El puente en el punto *D* es estirado por un hilo fino de seda *3*, el cual, envolviendo el rodillo *4*, se fija con su otro extremo al muelle plano de acero *5*. La corriente, pasando por el hilo de platino e iridio lo calienta (en algunos tipos hasta 300°C). Debido a la dilatación lineal del hilo *1*, se desplazan el hilo metálico *2*, el hilo de seda *3* y el muelle *5*. En la fig. 332 se muestra con línea punteada la posición de las partes del instrumento después de la dilatación del hilo de platino e iridio. La cantidad de calor que desprende la corriente es proporcional al cuadrado de la corriente y a la resistencia del hilo (I^2R). Sin tomar en consideración cierta variación de la resistencia del hilo durante el calentamiento, se puede suponer que el hilo se calienta proporcionalmente al cuadrado de la corriente. Por con-

siguiente, la escala del instrumento térmico no es uniforme. El instrumento térmico puede funcionar en los circuitos de corrientes continua y alterna; en circuitos de corriente alterna el instrumento indicará el valor eficaz de la magnitud que se mide.

Puesto que en el funcionamiento del instrumento no participan campos magnéticos, en sus indicaciones no influyen campos magnéticos exteriores. La ausencia de hierro y una inductancia insignificante del hilo corto aseguran la independencia de indicaciones del instrumento térmico a las variaciones, en amplios límites, de frecuencia de la corriente. Esta circunstancia explica la amplia aplicación de los instrumentos de dicho tipo en los circuitos con frecuencia elevada y alta. Con frecuencia, el amortiguamiento del instrumento suele ser electromagnético. Para este fin, sobre el eje del instrumento se encuentra una placa de aluminio *7* dispuesta entre los polos de un potente imán *8* en forma de herradura. Al girar el eje, la placa *7* interseca el campo magnético y en ella se inducen corrientes parásitas, las cuales, interactuando con el campo del imán, amortiguan rápidamente la parte móvil del instrumento.

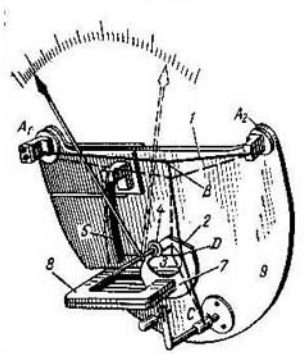


Fig. 332. Esquema de un instrumento de sistema térmico

Sin embargo, a pesar de sus cualidades positivas, los instrumentos térmicos presentan varios inconvenientes. El fundamental es la dependencia de las indicaciones del instrumento de la temperatura ambiente. Para reducir esta influencia la plancha *9*, sobre la cual se fijan todas las partes del instrumento, se fabrica de dos distintos metales que tienen el mismo coeficiente de dilatación térmica que el hilo de platino e iridio, gracias a lo cual, bajo la acción de la temperatura ambiente, la plancha y el hilo se dilatan por igual y la tensión del hilo queda invariable. Hay también otros procedimientos que compensan la influencia de la temperatura exterior. Los instrumentos térmicos no soportan sobrecargas, ya que en este caso el hilo se funde o adquiere deformación permanente, después de lo cual es necesario graduar de nuevo la escala del instrumento.

El gasto de potencia es muy grande y llega en amperímetros de 5 A, de 1 a 3 W, en voltímetros de 150 V, de 20 a 30 W. La precisión de los instrumentos no es grande, alcanzando errores de 1,5 a 2%. No obstante, señalaremos, que actualmente los instrumentos térmicos no se producen, siendo sustituidos por los termoeléctricos con convertidores de aire o de vacío, que son más ventajosos que los térmicos.

§ 166. Instrumentos inductivos de medición

Este sistema se caracteriza por el empleo de varias bobinas fijas que se alimentan con corriente alterna y crean un campo magnético giratorio o desplazable que induce corrientes en la parte móvil del instrumento y causa su movimiento.

Los instrumentos inductivos se emplean solamente con corriente alterna como vatímetros y contadores de energía eléctrica (más raramente, como amperímetros y voltímetros). A continuación analizaremos la teoría de los instrumentos inductivos. Conviene señalar,

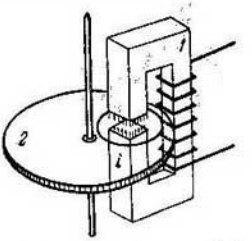


Fig. 333. Inducción de corrientes parásitas por el flujo magnético variable en un disco

que actualmente las fábricas de aparatos de mediciones eléctricas no producen vatímetros inductivos. Estos han sido sustituidos por los ferrodinámicos, cuyas indicaciones dependen menos de la temperatura y la frecuencia. En la fig. 333 se muestra el electroimán *1* y el disco de aluminio *2* que puede girar sobre el eje. La corriente alterna que pasa por el devanado del electroimán crea un flujo magnético alterno que induce en el disco de aluminio una f.e.m.

Del § 86 sabemos que la f.e.m. inducida se retarda 90° en fase del flujo magnético Φ_1 que la origina. La corriente i_1, surgida en el disco de aluminio está en fase con la f.e.m. y también se retarda 90° del flujo magnético Φ_1. La corriente i_1, interactuando con el flujo magnético Φ_1 puede crear una fuerza bajo cuya acción el disco girará. Pero en el caso dado esto no ocurrirá (véase la fig. 334, *a*).

La fuerza de interacción F, proporcional a la corriente i_1 y al flujo magnético Φ_1 cambiando cuatro veces su dirección durante un ciclo, no permite girar al disco. Si sobre el disco colocamos otro electroimán, junto al primero, su flujo magnético Φ_2 creará en el disco una corriente inducida i_2. Si logramos que los flujos Φ_1 y Φ_2 estén desfasados, las corrientes i_1 e i_2 resultarán también desfasadas y el ángulo entre Φ_1 e i_2 o entre Φ_2 e i_1 ya no será igual a 90°. En la fig. 334, *b* se ve, que en este caso la fuerza de interacción prevalecerá en una de las direcciones, debido a lo cual el disco girará. Si los flujos Φ_1 y Φ_2 están desfasados 90°, la fuerza que actúa sobre el disco será máxima.

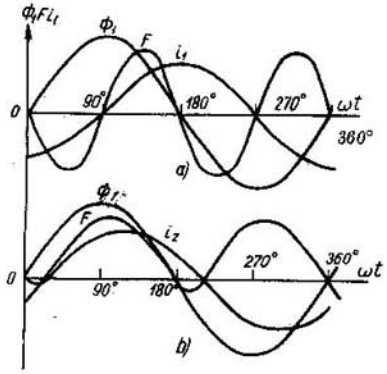


Fig. 334. Curvas de flujos magnéticos y de corrientes parásitas inducidas en un disco

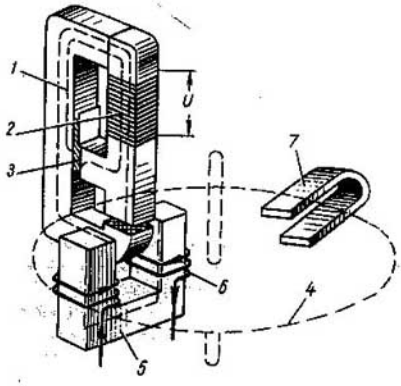


Fig. 335. Esquema de un instrumento de inducción con campo desplazable

Los instrumentos inductivos se dividen en dos grupos: los de campo magnético desplazable y los de campo magnético giratorio.

Estudiemos la construcción y el funcionamiento de un instrumento inductivo con campo desplazable (fig. 335).

En el conductor magnético *1* se dispone la bobina *2* que consta de gran número de espiras de alambre fino. El flujo magnético que crea esta bobina pasa en su mayor parte por el shunt magnético *3* y el

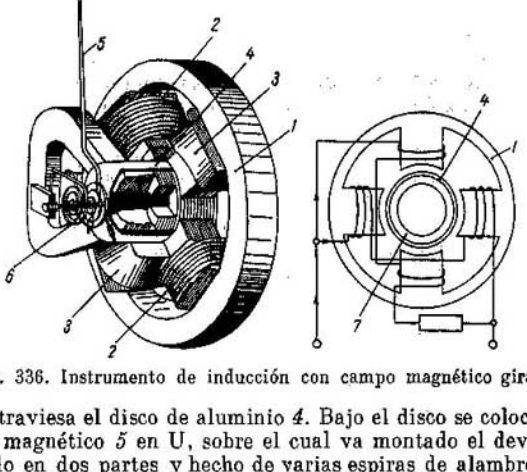


Fig. 336. Instrumento de inducción con campo magnético giratorio

resto atraviesa el disco de aluminio *4*. Bajo el disco se coloca el conductor magnético *5* en U, sobre el cual va montado el devanado *6*, dividido en dos partes y hecho de varias espiras de alambre grueso. El flujo magnético de dicho devanado atraviesa dos veces el disco. Dos flujos magnéticos que están desfasados uno respecto al otro inducen en el disco de aluminio corrientes parásitas, las cuales, interactuando con los flujos, crean un par de arranque bajo cuya influencia el disco se pone en movimiento.

El amortiguamiento del disco se realiza mediante el imán de herradura *7*.

En la fig. 336 está representado el esquema de un instrumento inductivo con campo magnético giratorio. Sobre el disco magnético *1*, compuesto de chapas de acero electrotécnico, se arrollan dos devanados, uno de los cuales, *2*, se dispone sobre dos polos salientes y opuestos del conductor magnético, y el otro, *3*, sobre otros dos salientes opuestos. Entre los polos, sobre un eje se ecuentra el cilindro de aluminio *4*. Sobre el eje se fija también la aguja *5* y el muelle espiral *6*. Dentro del cilindro de aluminio está alojado un núcleo cilíndrico de acero *7*, cuya misión consiste en disminuir la reluctancia. Al pasar la corriente alterna, los devanados *2* y *3* crean dos flujos magnéticos.

Anteriormente se dijo, que para obtener un par de arranque máximo hace falta que los flujos magnéticos estén en cuadratura (desfasados 90°). Esto se logra arrollando sobre dos bobinas opuestas un número pequeño de espiras de alambre grueso. Este devanado es una resistencia activa y la corriente en él coincide en fase con la tensión. Las otras dos bobinas opuestas se arrollan con gran número de espiras de alambre fino, lo que hace surgir entre la corriente y la tensión un desfasamiento próximo a 90°, debido a la gran reactancia inductiva de estas dos bobinas. Se puede obtener también un desfasamiento entre los flujos, seleccionando y conectando reactancias inductivas y resistencias activas suplementarias. El campo magnético que se desplaza por la circunferencia del entrehierro girará con velocidad determinada respecto al eje del sistema móvil del instrumento. Dicho campo, atravesando el cilindro de aluminio *4*, inducirá en éste corrientes parásitas, las cuales, interactuando con el campo magnético, harán girar el cilindro en el sentido de rotación del campo. De lo estudiado sobre el principio de funcionamiento de los instrumentos inductivos con campo magnético giratorio se ve, que éste es idéntico al de los motores asincrónicos bifásicos de jaula de ardilla.

El amortiguamiento del instrumento se efectúa por las corrientes parásitas que se inducen en las partes superiores del cilindro de aluminio durante su movimiento en el campo de dos imanes permanentes (uno de éstos no se ve en el dibujo). Los campos magnéticos exteriores no ejercen influencia sobre el funcionamiento de los instrumentos inductivos, debido a la existencia en éstos de un potente campo magnético propio. Las ventajas de los instrumentos inductivos son también: la solidez de la construcción, resistencia a sobrecargas y funcionamiento sin fallas. Los inconvenientes presentados por los instrumentos inductivos son: el de servir sólo para corriente alterna, escala no uniforme, dependencia de sus indicaciones de la temperatura y la frecuencia, baja precisión (de 1,0 a 1,5%). El gasto de potencia en los instrumentos inductivos es de 2 a 4 W.

§ 167. Instrumentos de sistema termoeléctrico

El principio de funcionamiento de los instrumentos termoeléctricos se funda en la utilización de la f.e.m que surge en un circuito compuesto de conductores heterogéneos, si el lugar de unión de estos conductores tiene una temperatura que se diferencia de la de la parte restante del circuito.

En la fig. 337 se da el esquema de un instrumento termoeléctrico.

La corriente que se mide pasa por el hilo metálico *1*, al cual están soldados dos conductores heterogéneos *2*, por ejemplo, de hierro y de constantán. Los extremos libres de los conductores *2* están conectados a las zapatas metálicas *3* que conducen bien el calor. A las zapatas se intercala un instrumento magnetoeléctrico de medición *4*.

Cuando por el hilo *1* pasa la corriente, el hilo y el lugar de su soldadura con los conductores (punto *5*) se calientan. El punto *5* representa la soldadura caliente del termopar. Las zapatas metálicas *3* son soldaduras frías del termopar. Debido a la diferencia de temperaturas, en el circuito cerrado surge una f.e.m. térmica que crea una corriente en este circuito. La dirección de la corriente térmica será invariable, independientemente del sentido de la corriente que se mide.

La cantidad del calor desprendido en la soldadura caliente del termopar, de acuerdo con la ley de Joule-Lenz, es proporcional al

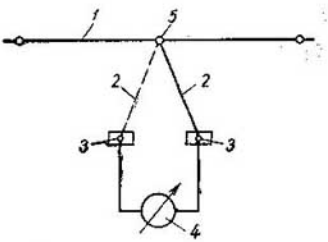


Fig. 337. Esquema de un instrumento de sistema termoeléctrico

cuadrado de la corriente. Por eso la escala del instrumento magnetoeléctrico que se utiliza en dicho sistema no es uniforme. Para obtener una escala uniforme, el campo magnético del instrumento magnetoeléctrico se hace heterogéneo. La f.e.m. térmica de un par térmico no supera 15 mV, lo que requiere la instalación de un instrumento magnetoeléctrico de gran sensibilidad. Para aumentar la magnitud de la f.e.m. térmica, se conectan varios termopares en serie en una batería térmica.

Los instrumentos termoeléctricos sensibles se fabrican con el termopar colocado en vacío.

Los instrumentos de sistema termoeléctrico son sensibles a las sobrecargas; incluso con una sobrecarga no prolongada de 10%, el hilo de calentamiento puede fundirse. La precisión de los instrumentos es bastante alta, lo que permite fabricarlos de clase 0,5 y 1. Los instrumentos termoeléctricos han adquirido máxima aplicación en la medición de pequeños valores de corrientes alternas en los circuitos de alta frecuencia.

§ 168. Instrumentos de sistema detector

Los instrumentos de sistema detector son una combinación de un instrumento magnetoeléctrico de medición con uno o varios rectificadores semiconductores (detectores) conectados en un esquema. Como

rectificadores (detectores) se utilizan generalmente los de óxido de cobre.

En la fig. 338 se muestran los esquemas de conexión de los detectores con el instrumento magnetoeléctrico. Los instrumentos de dicho sistema se emplean para medir pequeñas magnitudes de corriente

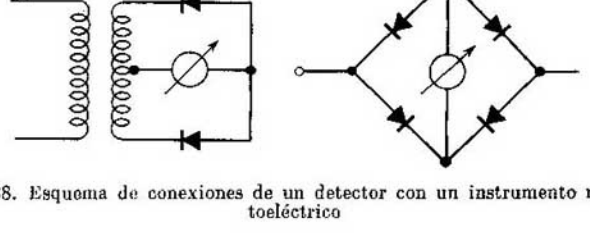


Fig. 338. Esquema de conexiones de un detector con un instrumento magnetoeléctrico

alterna y de tensión (a partir de décimas de miliamperio y de voltio) así como para mediciones en circuitos de frecuencia elevada (de 50 a 2000 Hz). Se utilizan principalmente los instrumentos universales: voltamperímetros de corriente continua y alterna de amplios límites. La precisión de los instrumentos detectores es pequeña: se fabrican generalmente del tipo 2,5.



Fig. 339. Esquema de un frecuencímetro

§ 169. Instrumentos de sistema de resonancia

Este sistema se caracteriza por el empleo de una serie de placas sintonizadas que tienen diferentes períodos propios de vibración y que permiten medir la frecuencia debido a la resonancia de la frecuencia de la lengüeta vibratoria con la frecuencia que se mide. Los instrumentos de resonancia son los frecuencímetros. En la fig. 339 se muestra la estructura de un frecuencímetro de resonancia.

El electroimán, cuyo devanado *1* se alimenta de una red de corriente alterna está dispuesto sobre la placa de acero (inducido) *2*, fijada en la barra metálica *3*. Sobre la barra están situadas varias lengüetas de acero *4*, sintonizadas a diferentes períodos propios de vibración. La barra está atornillada a muelles planos *5*. Los extremos de las lengüetas están doblados y pintados de blanco. Al pasar la corriente alterna por el devanado del electroimán se crea un flujo magnético

alterno, el cual, actuando sobre el inducido *2*, lo hace oscilar. Este movimiento oscilatorio se transmite a la barra *3* y a las lengüetas *4*.

Aunque todas las lengüetas comienzan a oscilar, obtiene la mayor amplitud la lengüeta cuyo propio período de oscilaciones coincide con la frecuencia de variación del flujo magnético, es decir, con la frecuencia de la corriente alterna. En la escotadura rectangular de la escala del frecuencímetro se ven los extremos pintados de las lengüetas. Frente a cada lámina, en la escala del instrumento hay una

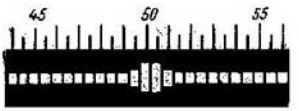


Fig. 340 Parte de la escala de un frecuencímetro de resonancia



Fig. 341. Aspecto general de un frecuencímetro de resonancia

cifra que corresponde a la frecuencia de la corriente, en hertzios. Durante el funcionamiento del instrumento, el extremo pintado de la lengüeta en resonancia forma una banda continua clara.

Una parte de la escala de un frecuencímetro de resonancia se muestra en la fig. 340.

El aspecto general de un frecuencímetro de vibración se da en la fig. 341.

El devanado del electroimán del frecuencímetro consta de gran número de espiras de alambre fino y se conecta en paralelo a la red, igual que el devanado de un voltímetro.

Concluyendo el estudio de distintos sistemas de instrumentos eléctricos de medición, damos las designaciones convencionales que se utilizan en las escalas de los instrumentos (fig. 342).

Conviene señalar, que actualmente los frecuencímetros de resonancia se emplean poco y se sustituyen por los de aguja que tienen una escala continua.

§ 170. Transformadores de medición

En las redes de corriente alterna, para aislar con fines de seguridad los instrumentos de medición de los conductores de alta tensión así como para ampliar los límites de medición de los instrumentos, se emplean transformadores para medir la tensión y la intensidad de la corriente.

Sistema del aparato	Signo del sistema	
	sin pantalla	con pantalla magnética
Magnetoeléctrico, con fuerza antagónica mecánica		
Lo mismo, sin fuerza antagónica		
Electromagnético, con fuerza antagónica		
Lo mismo, sin fuerza antagónica		
Electrodinámico, con fuerza antagónica		
Lo mismo, sin fuerza antagónica		
Ferrodinámico, con fuerza antagónica		
Lo mismo, sin fuerza antagónica		
De inducción, con fuerza antagónica		—
Lo mismo, sin fuerza antagónica		—
Térmico		—
Termoeléctrico		—
De detector		—
Electrónico		—
Electrostático		—
De resonancia		—

Objeto designado	Signo convencional
Corriente continua	
Corriente alterna	
Corriente continua y alterna	
Corriente trifásica:	
carga uniforme	
carga irregular	
sistema tetrafilar	
Frecuencia de 50 Hz	≈50
El aislamiento del aparato está ensayado para 2 kV	
Posición vertical de la escala	
Posición horizontal de la escala	
Posición inclinada de la escala (por ejemplo, a un ángulo de 60°)	∠ 60°
Clase del aparato (por ejemplo, 0,2)	0,2

Fig. 342. Designaciones convencionales en las escalas de los instrumentos eléctricos de medición

Para asegurar alta precisión en las mediciones, los transformadores de tensión (intensidad) no deben cambiar su relación de transformación y tener un ángulo constante de 180° entre los vectores de tensión (intensidad) primaria y secundaria. La última condición es necesaria cuando se conectan a través de transformadores de tensión (intensidad) instrumentos cuyas indicaciones dependen del ángulo de desfasamiento entre la tensión y la intensidad de la red (por ejemplo, vatímetros, contadores, fasímetros, etc.).

Pero en la práctica, los transformadores de tensión (intensidad) no satisfacen estos requisitos y tienen el así llamado *error en la relación de transformación y error angular*. Se llama relación nominal de transformación de un transformador de tensión k_t (intensidad k_i) la relación entre la magnitud nominal de la tensión (intensidad) primaria y la magnitud nominal de la tensión (intensidad) secundaria.

Se llama error relativo en la relación de transformación, la diferencia entre la tensión (intensidad) secundaria multiplicada por la relación de transformación y la magnitud real de la tensión (intensidad) primaria relacionada a la magnitud real de la tensión (intensidad) primaria:

$$\gamma_U = \frac{k_t U_2 - U_1}{U_1}; \quad \gamma_I = \frac{k_i I_2 - I_1}{I_1}.$$

Se llama error angular de un transformador de medición de tensión (intensidad) al ángulo entre el vector de tensión (intensidad) primaria y el vector girado 180° de tensión (intensidad) secundaria.

El error en la relación de transformación y el error angular aumentan al crecer la carga. Por eso los transformadores no se pueden cargar más de la potencia nominal (indicada en la ficha técnica).

Los transformadores que se fabrican en la URSS, en los límites de potencia nominal, pueden tener error en la relación de transformación de hasta $\pm 1\%$ y el error angular de $\pm 45'$.

§ 171. Transformadores de tensión

Los devanados primario y secundario de un transformador para medir tensiones se hacen de alambre aislado de cobre y se ponen sobre un núcleo cerrado, armado de chapas de acero de transformador. El transformador (tran formador de fuerza) para alimentar las lámparas de incandescencia, motores, etc. no se diferencia en principio por su estructura de un transformador de tensión que sirve para alimentar circuitos de tensión de instrumentos eléctricos de medición.

La relación nominal de transformación se indica habitualmente en la ficha técnica del transformador en forma de un quebrado, cuyo numerador indica la tensión del devanado primario, y el denominador, la del secundario, por ejemplo, 6.000/100, es decir, k_n es igual en este caso a 60.

Según la norma soviética, todos los transformadores de tensión que se fabrican en la URSS tienen tensión secundaria de 100 V. Las potencias nominales de los transformadores de tensión son de 200 a 2.000 VA.

Conociendo la relación de transformación del transformador y la tensión del devanado secundario, se puede determinar la tensión primaria:

$$U_1 = k_t U_2.$$

Para los instrumentos que funcionan constantemente con un mismo transformador, la escala se gradúa teniendo en cuenta la relación de transformación para la tensión primaria.

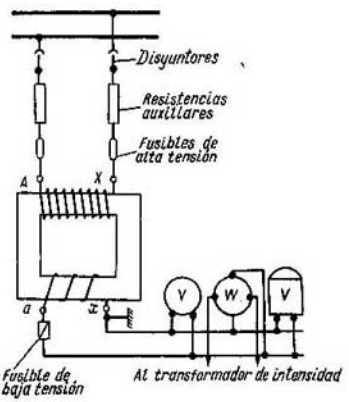


Fig. 343. Esquema de conexión de un transformador monofásico de tensión

En la ficha técnica del transformador se indica la potencia nominal. Para evitar errores durante las mediciones, es necesario que la potencia global, que consumen todos los instrumentos conectados al transformador, no sea superior a la nominal del mismo.

Se producen transformadores de tensión monofásicos y trifásicos. En la fig. 343 se presenta el esquema de conexión de un transformador monofásico. Para proteger el transformador de sobrecargas y cortocircuitos, se intercala en el circuito de instrumentos de medición, en el devanado secundario, un fusible de baja tensión. En caso de perforación del aislamiento del devanado de alta tensión, el núcleo y el devanado secundario pueden alcanzar un alto potencial. Para evitar esto, el devanado secundario y las partes metálicas del transformador se conectan a tierra. En el extremo del devanado secundario conectado a tierra, no se intercala el fusible.

Con el fin de proteger la red de alto voltaje de cortocircuitos en el devanado primario del transformador, éste se conecta a la red a través de fusibles de alto voltaje. Para facilitar su funcionamiento, a éstos se conectan en serie resistencias adicionales limitadores de corriente, las cuales, disminuyendo la magnitud de la corriente de cortocircuito,

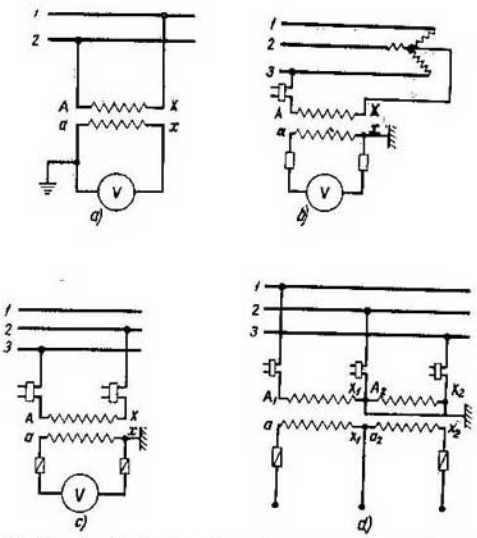


Fig. 344. Empleo de los transformadores monofásicos de tensión:
a — medición de la tensión de la red de corriente monofásica, *b* — medición de la tensión de fase en la red de corriente trifásica, *c* — medición de la tensión compuesta en la red de corriente trifásica, *d* — conexión de dos transformadores monofásicos de tensión según el esquema de «triángulo abierto»

aseguran el funcionamiento seguro de los fusibles. Para desconectar el transformador de la red se usan disyuntores.

Los transformadores de tensión se dividen en cuatro clases de precisión: 0,2; 0,5; 1 y 3. Las cifras señalan, en tanto por ciento, el error en tensión. Para las tensiones de hasta 3 kV, los transformadores se fabrican con refrigeración por aire, para las superiores a 6 kV, con refrigeración de aceite.

Los transformadores de tensión se emplean: para medir tensiones en las redes de alto voltaje; para conectar los relés de tensión, bobinas de tensión nula de mandos automáticos y a mano, frecuencímetros y lámparas indicadoras; para alimentar devanados en paralelo de vatímetros, contadores y fasímetros; para controlar el aisla-

miento. En la fig. 344 se muestra el empleo de transformadores de tensión: a) medición de la tensión en la red de corriente monofásica; b) medición de la tensión de fase en una red de corriente trifásica, c) medición de la tensión compuesta en una red de corriente

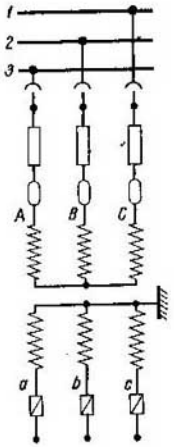


Fig. 345. Esquema de conexión de un transformador trifásico de tensión



Fig. 346. Transformador de tensión НКФ-220

trifásica; d) conexión de dos transformadores monofásicos de tensión según el esquema de «triángulo abierto», que permite medir las tres tensiones compuestas. En las redes de corriente trifásica se utilizan también transformadores trifásicos para medir la tensión.

El esquema de conexión del transformador mencionado se da en la fig. 345.

En la fig. 346 se muestra el aspecto exterior de un transformador monofásico de tensión НКФ-220 (altura, 3,75 m; peso total, 2.640 kg).

En la fig. 347 se dan ejemplos de la aplicación de transformadores de tensión para controlar el estado del aislamiento de la red: a) control del estado del aislamiento de una línea de corriente monofásica respecto a la «tierra». Si el estado del aislamiento es bueno, cada uno de los voltímetros indicará la mitad de la tensión de la red. Si uno de los conductores se cierra a «tierra», el voltímetro conectado entre dicho conductor y la «tierra» indicará cero, y el otro voltímetro, la tensión total de la red; b) control del estado del aislamiento de una red de corriente trifásica. Si el estado del aislamiento es bueno, cada uno de los voltímetros indicará la tensión de fase. Si un

conductor está cerrado a «tierra», el voltímetro conectado a dicho conductor indicará cero, y los otros dos, tensión compuesta. Si utilizamos para este fin un transformador trifásico de tres columnas con punto neutro conectado a tierra por la parte de alto voltaje, entonces, en el caso en que la red tenga contacto con la tierra («haga tierra»), uno de los devanados del transformador resultará cortocircuitado y los otros dos inducirán gran corriente en él, lo que puede

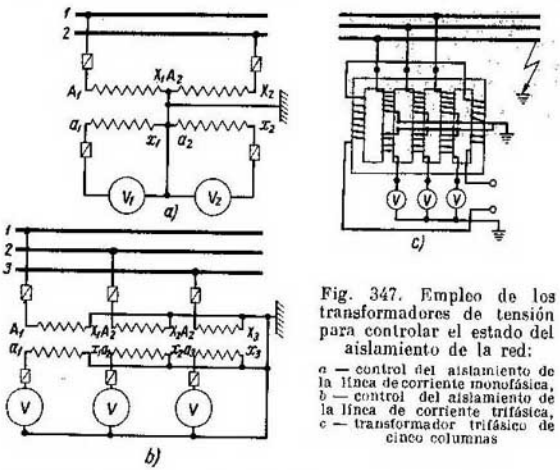


Fig. 347. Empleo de los transformadores de tensión para controlar el estado del aislamiento de la red:
a — control del aislamiento de la línea de corriente monofásica, *b* — control del aislamiento de la línea de corriente trifásica, *c* — transformador trifásico de cinco columnas

llevar al deterioro del transformador. Para evitar esto los transformadores trifásicos de tres columnas se fabrican sin punto neutro por la parte de alto voltaje; c) transformador trifásico de cinco columnas que se emplea en las redes de corriente trifásica para controlar el aislamiento. Si el estado de la red es bueno, la suma geométrica de los flujos magnéticos es igual a cero y el flujo magnético no pasa por las columnas extremas. Al conectar a tierra uno de los conductores de la red de alto voltaje, el devanado correspondiente del transformador resultará cerrado, los flujos magnéticos de las demás fases se cerrarán a través de las columnas extremas e inducirán una f.e.m. en el devanado auxiliar. Los transformadores de tensión se dividen en tres grupos:

1. Transformadores secos (con refrigeración por aire), tipo НОС-0,5; НОС-0,3; НТС-0,5 y НТСН-0,5.

2. Transformadores de aceite, tipo НОМ-10; НОМ-35; НТМК-6; НТМК-10; НТМИ-6 y НТМИ-10.

3. Transformadores en cascada de aceite, tipo НКФ-110, НКФ-220.

Las siglas que se usan para denominar los transformadres son: НОС, transformador de tensión monofásico seco;НТС, transformador de tensión trifásico seco; НТСИ, transformador de tensión trifásico seco de tres devanados y de cinco columnas para controlar el aislamiento; НОМ, transformador de tensión monofásico de aceite; НТМК, transformador de tensión trifásico de aceite con devanado compensador; НТМИ, transformador de tensión trifásico de aceite de tres devanados y cinco columnas para controlar el aislamiento; НКФ, transformador de tensión monofásico en cascada con cubierta de porcelana. La cifra que sigue a la sigla indica la tensión nominal máxima del tipo de transformador dado en kilovoltios.

Los transformadores de tensión están destinados para instalaciones interiores, excepto НОМ-35, НКФ-110 y НКФ-220, que sirven para instalaciones exteriores.

En los transformadores trifásicos de tres columnas НТМК las espiras principales de la fase dada del devanado primario se conectan con un número pequeño de espiras de compensación de la otra fase. Esta unión da posibilidad de reducir (compensar) el error angular del transformador y aumentar de este modo su precisión. Los transformadores en cascada constan de varios transformadores y el devanado secundario del anterior suministra la tensión al devanado primario del siguiente.

§ 172. Transformadores de intensidad

Los transformadores de intensidad sirven para transformar una corriente de gran magnitud en una pequeña. En la fig. 348 se muestran la estructura y el esquema de conexión de un transformador de intensidad. Sobre un núcleo, armado de chapas de acero de transformador, se arrollan dos devanados: el primario, que consta de un número pequeño de espiras y que se conecta en serie a la red, por la cual pasa la corriente que se va a medir, y, el secundario, que consta de gran número de espiras y en el cual están intercalados los instrumentos de medición. Al medir la intensidad de corriente en las redes de alta tensión, los instrumentos de medición están separados y aislados de los conductores de alto voltaje. El devanado secundario del transformador de intensidad se hace generalmente para una corriente de 5 A (a veces, para 10 A), las corrientes primarias nominales pueden ser de 5 a 15 000 A.

La relación entre la corriente primaria y la secundaria, igual aproximadamente a la relación inversa de espiras de los devanados, se denomina *relación de transformación de un transformador de intensidad*. La relación de transformación nominal se indica en la ficha técnica del transformador en forma de quebrado, cuyo numerador indica la corriente primaria nominal, y el denominador, la corriente secundaria nominal, por ejemplo, 150/5 A, es decir, $k_i = 30$.

Conociendo la corriente secundaria I_2 y la relación de transformación del transformador de intensidad k_i, se puede determinar la corriente primaria I_1:

$$I_1 = k_i I_2.$$

Los instrumentos que funcionan constantemente con el mismo transformador se gradúan para la corriente primaria, teniendo en cuenta la relación de transformación. El empleo del transformador para medir corriente conduce a errores inevitables (hasta $\pm 1\%$).

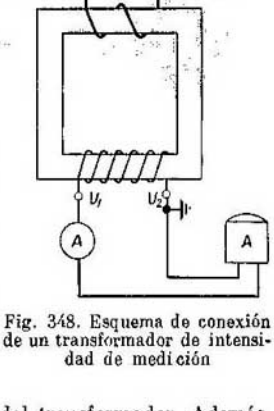


Fig. 348. Esquema de conexión de un transformador de intensidad de medición

Recordemos que en un transformador de tensión el flujo magnético resultante, en cualquier régimen de funcionamiento, queda casi constante. Pero, si en un transformador de intensidad aumentamos la resistencia en el circuito del devanado secundario, manteniendo constante la corriente primaria, esto llevará a la disminución de la corriente I_2 y del flujo Φ_2 lo que, a su vez, provocará el aumento del flujo resultante Φ. Al abrir el devanado secundario ($I_2 = 0$, $\Phi_2 = 0$) el flujo magnético resultante en el núcleo del transformador aumentará hasta la magnitud del flujo Φ_1. El núcleo calculado para el flujo resultante Φ, en este caso, comienza a recalentarse, lo que puede traer consigo el deterioro del transformador. Además, un flujo magnético elevado en comparación con el normal, inducirá en el devanado secundario una f.e.m. considerable (de 500 a 1.000 V), peligrosa para el que toque por casualidad sus bornes. Por eso, al pasar la corriente por el devanado primario se prohíbe abrir el secundario; éste debe estar siempre cerrado a los instrumentos de medición o cortocircuitado. Al aumentar la resistencia del circuito secundario, crece el flujo magnético resultante, el núcleo del transformador se satura, aumentando los errores del transformador.

Al conectar al transformador de intensidad instrumentos de medición es necesario observar que la potencia que éstos consumen no supere la nominal del transformador. Si, por ejemplo, la potencia del transformador es igual a 20 VA, y la corriente secundaria es de 5 A, la resistencia del circuito secundario no ha de ser mayor de

$$R = \frac{P}{I_2^2} = \frac{20}{25} = 0{,}8\ \Omega.$$

En los cálculos es necesario tomar en cuenta la resistencia de los conductores. La carga tolerable de los transformadores de intensidad está entre los límites de 15 a 75 VA.

En los transformadores de intensidad, un extremo del devanado secundario y la cubierta se conectan a tierra con el mismo fin que en los de tensión. Los transformadores de intensidad se dividen de acuerdo a distintas particularidades.

Según el modo de instalación: en transformadores para instalaciones interiores y exteriores. Según el tipo de aislamiento: en transformadores secos con aislamiento de porcelana o de papel, con relleno de

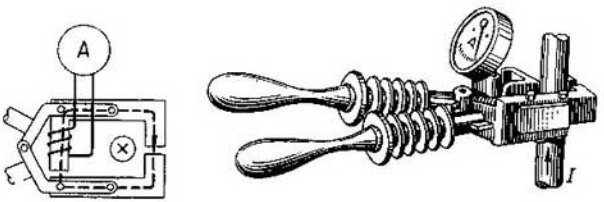


Fig. 349. Transformador de pinza

aceite, con relleno compuesto aislante (compound). Según la estructura: de bobina, de paso, de barras, encajados en casquillos de interruptores de aceite, de porcelana con orificio transversal, de pote, de soporte. Según el número de circuitos secundarios: de uno y de dos

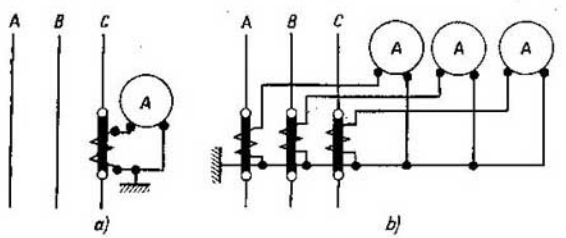


Fig. 350. Empleo de los transformadores de intensidad para la medición de la corriente:
a — en caso de carga uniforme, *b* — en caso de carga no uniforme

devanados. En el segundo caso el transformador tiene dos devanados secundarios arrollados sobre dos núcleos. Este transformador sirve para alimentar dos circuitos secundarios independientes: por ejemplo, los instrumentos de medición pueden alimentarse de un devanado, el relé, del otro. Según el número de espiras del devanado primario: de espira única y de espiras múltiples.

Según el grado de precisión los transformadores se dividen en cinco clases: 0,2; 0,5; 1; 3 y 10. Las cifras señalan el error en la relación de transformación en tanto por ciento.

Según su aplicación, se dividen en estacionarios y portátiles. Estos se fabrican con varias (hasta 28) relaciones de transformación.

Una especie de transformador de intensidad es el transformador de pinza (fig. 349). Un núcleo desarmable de acero por medio de mangos aislados puede separarse y abarcar un conductor o una barra. El amperímetro fijo en las pinzas está conectado a los extremos del devanado secundario, arrollado sobre el núcleo. El devanado primario es el conductor o barra con corriente que se ha de medir.

Los transformadores de intensidad sirven para la conexión de amperímetros, devanados en serie de vatímetros, contadores, fasímetros, relé de intensidad, etc.

En la fig. 350 se muestra el empleo de transformadores de intensidad: a) medición de intensidad, siendo uniforme la carga de fases; b) medición de intensidad, siendo variable la carga de fases.

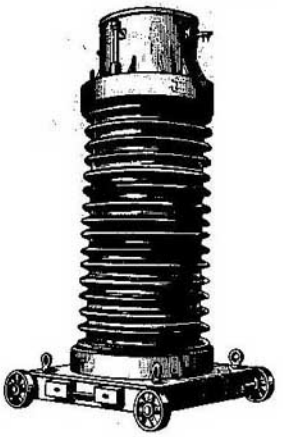


Fig. 351. Transformador de intensidad ТФНД-220

Explicación de las designaciones que se utilizan para transformadores de intensidad:

Т — transformador de intensidad,
П — de paso,
Ш — de barras,
У — reforzado,
Ф — con aislamiento de porcelana entre los devanados primario y secundario,
Д — núcleo de fabricación especial para protección diferencial,
З — núcleo de fabricación especial para la protección de puesta a «tierra»,
Р — núcleo desarmable,
О — de espira única (el devanado primario es una barra de cobre),
К — de bobina,
В — encajado en el interruptor,
М — modernizado,
Б — de rápida saturación.

La primera cifra después de la sigla significa tensión (kV), la siguiente (siguientes), número de devanados secundarios y su clase de precisión.

Por ejemplo, ТПФУД-10-0,5/Д significa: transformador de intensidad de paso con aislamiento de porcelana de fabricación reforzada para 10 kV con dos devanados (el primero, de clase de precisión 0,5, el segundo, para protección diferencial).

En la fig. 351 se muestra el aspecto exterior de un transformador de intensidad ТФНД-220 (tensión nominal, 220 kV, altura, 3.770 mm, peso con aceite, 4.400 kg).

§ 173. Medición de la intensidad de la corriente en el circuito

Para medir la intensidad de la corriente en el circuito se usan amperímetros conectados en serie a éste. Para que al conectar el amperímetro la intensidad en el circuito no varíe, es necesario, que la resistencia de su devanado sea muy pequeña. Para eso, el devanado del amperímetro se hace de un número pequeño de espiras de alambre

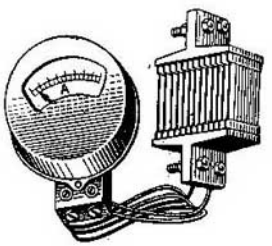


Fig. 352. Amperímetro con shunt

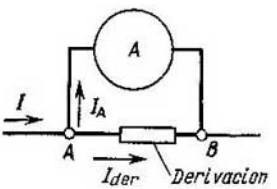


Fig. 353. Esquema de conexión de un amperímetro con shunt

grueso. Para ampliar los límites de medición del amperímetro se utilizan shunts (derivaciones). Los shunts son placas o barras de manganina soldados a terminales de cobre o latón (fig. 352). El shunt se conecta al circuito en serie. En paralelo con éste se intercala un amperímetro (fig. 353). La corriente I del circuito en el punto A se deriva inversamente proporcional a las resistencias del devanado del amperímetro R_a y del shunt R_{sh}:

$$\frac{I_a}{I_{sh}} = \frac{R_{sh}}{R_a}, \quad I_{sh} = I - I_a,$$

de donde la resistencia del shunt será:

$$R_{sh} = \frac{I_a R_a}{I - I_a}.$$

Designemos la relación entre la corriente I y la I_a con n (a veces el número n se denomina coeficiente de derivación). Entonces, la expresión para R_{sh} se puede escribir así:

$$R_{sh} = \frac{R_a}{n-1}.$$

Ejemplo 1. Determinar la resistencia de un shunt para un amperímetro de 5 A con resistencia interior de 0,006Ω. La corriente a medir es de 20 A.

$$I_a = 5 \text{ A} \qquad n = \frac{20}{5} = 4$$

$$R_a = 0{,}006\ \Omega \qquad R_{sh} = \frac{R_a}{n-1} = \frac{0{,}006}{3} = 0{,}002\ \Omega.$$

$$I = 20 \text{ A}$$

Los shunts para intensidades no mayores de 100 A se alojan en el interior del instrumento (shunt interior). Los shunts para intensidades más altas son exteriores y se conectan a los amperímetros mediante conductores, cuya resistencia está verificada con exactitud, ya que en caso contrario la distribución de las corrientes será diferente y la medición, errónea. Existen shunts universales para varios límites de mediciones. Los instrumentos que funcionan siempre con shunts individuales se gradúan tomando en consideración el shunt, lo que se indica en la escala del instrumento. A menudo se usan también shunts calibrados. Este shunt se puede conectar a cualquier instrumento cuyo valor de la caída de tensión es el mismo que del shunt dado. Los shunts se montan habitualmente en los instrumentos de sistema magnetoeléctrico para mediciones en circuitos de corriente continua. Para ampliar los límites de medición de los amperímetros, en los circuitos de corriente alterna se utilizan transformadores de intensidad.

§ 174. Medición de diferencias de potencial

Para medir diferencias de potencial se emplean voltímetros. Los voltímetros se conectan en paralelo al sector del circuito donde es necesario medir la diferencia de potencial. Para que el instrumento

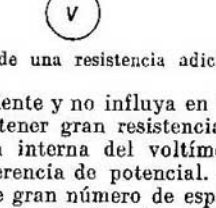


Fig. 354. Conexión de una resistencia adicional al voltímetro

no consuma mucha corriente y no influya en la magnitud de la tensión del circuito debe tener gran resistencia su devanado. Cuanto mayor es la resistencia interna del voltímetro, con tanta mayor precisión medirá la diferencia de potencial. Para esto el devanado del voltímetro consta de gran número de espiras de alambre fino.

Con el fin de ampliar los límites de medición de los voltímetros se utilizan resistencias adicionales que se conectan en serie con los voltímetros (fig. 354). En este caso la tensión de la red se distribuye

entre el voltímetro y la resistencia adicional. La magnitud de la resistencia adicional se elige de modo que en el circuito con tensión elevada pase por el devanado del voltímetro la misma corriente que con tensión nominal. La corriente para la cual está calculado el devanado del instrumento es:

$$I_v = \frac{U}{R_v}.$$

En el circuito con tensión n veces mayor, la corriente del voltímetro con resistencia adicional R tiene que conservar su magnitud anterior.

$$I_v = \frac{nU}{R_v + R} \quad \text{ó} \quad \frac{U}{r_v} = \frac{nU}{R_v + R},$$

de donde la magnitud de la resistencia adicional es igual a:

$$R = R_v(n-1).$$

Ejemplo 2. Mediante un voltímetro para 25 V es necesario medir una diferencia de potencial de 150 V. Determinar la magnitud de la resistencia adicional, si la resistencia interna del voltímetro es de 1.000Ω:

$$R_v = 1.000, \quad n = 150 : 25 = 6 \quad \Big| \quad R = R_v(n-1) = 1.000\,(6-1) = 5.000\ \Omega.$$

Las resistencias adicionales se fabrican de alambre de manganina arrollado sobre una armazón de guctinax de porcelana. Las resistencias adicionales se instalan en el interior del instrumento o independiente de él. Para medir altas tensiones de corriente alterna se utilizan transformadores de tensión.

§ 175. Reóstato

En la práctica de mediciones eléctricas, así como durante el servicio de máquinas eléctricas, se emplean diferentes reóstatos.



Fig. 355. Reóstato de contacto deslizante

Se llama r e ó s t a t o el instrumento que dispone de una resistencia variable, que permite a su vez cambiar la intensidad y la tensión del circuito. Los reóstatos son de contacto deslizante, de palanca, líquidos (electrolíticos), de lámpara y de clavijas.

Reóstato de contacto deslizante. (fig. 355). Sobre un tubo de porcelana *1* se arrolla alambre desnudo *2*. Después de un tratamiento especial, la superficie del alambre se cubre de una película fina de óxido que no conduce corriente. Por la varilla metálica *3* se desliza el cursor *4*, apretándose al alambre del reóstato. Para la posición del cursor, indicada en la fig. 355 el recorrido de la corriente eléctrica se señala con flechas. Puesto que junto con la lámpara eléctrica *5*, en el circuito está incluida en serie una parte de la resistencia del reóstato, la corriente que pasa a través del filamento de la lámpara será menor y la lámpara dará menor iluminación. Desplazando el cursor a la derecha, disminuiremos la resistencia del reóstato y la luminosidad de la lámpara aumentará. Los reóstatos de contacto deslizante se emplean para variar gradual y lentamente la corriente en el circuito.

Reóstato de palanca (fig. 356). Sobre una armadura de materia aislante se arrollan espiras de alambre. Las espiras se conectan en serie. Desde ambos extremos de la espira y los lugares de conexió

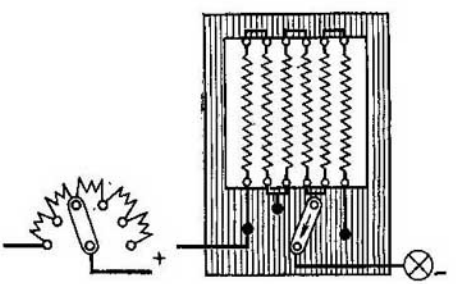


Fig. 356. Reóstato de palanca

de cada una de ellas se hacen derivaciones a los contactos. Colocando la palanca sobre un contacto determinado del reóstato, podemos variar la resistencia y, de esta manera, variamos también la corriente en el circuito. Pero las variaciones no son graduales, sino a saltos. El aspecto exterior de un reóstato de palanca se muestra en la fig. 357.

Para los reóstatos de alambre se utilizan generalmente hierro, niquelina, constantán, manganina, nicromo.

Reóstato líquido (fig. 358). El reóstato es un recipiente metálico *1* que contiene solución de sosa. A la charnela *2* está fija la palanca *3*, que lleva una cuchilla de hierro de cobre *4*. La palanca está aislada de la caja metálica mediante la junta *5*. Haciendo emerger la cuchilla de la solución de sosa o sumergiéndola en ella podemos variar la co-

rriente en el circuito. Sumergiendo la cuchilla en la solución aumentamos su superficie de contacto con ésta, aumentando de este modo la corriente que pasa a través del reóstato. Al seguir sumergiendo

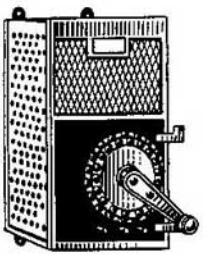


Fig. 357. Aspecto exterior de un reóstato de palanca

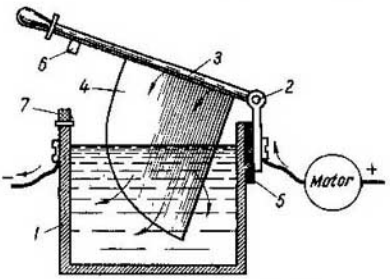


Fig. 358. Reóstato líquido

la cuchilla, el contacto 6 del mango entra en el contacto de apriete 7 del cuerpo metálico y el reóstato se pone en cortocircuito, es decir, se desconecta.

Los reóstatos líquidos se emplean en circuitos de grandes corrientes.

Reóstato de lámpara (fig. 359). Es un juego de varias lámparas eléctricas que se conectan en paralelo. Es sabido, que si una lámpara de incandescencia tiene una resistencia de 150 ohmios, dos lámparas

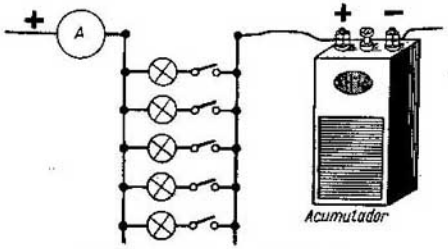


Fig. 359. Reóstato de lámpara

semejantes conectadas en paralelo tendrán solamente una resistencia global de 75 ohmios, tres lámparas, 50 ohmios, etc.

De este modo, la resistencia total de varias lámparas iguales, conectadas en paralelo, será igual a la de una lámpara dividida por el número de lámparas conectadas. El reóstato de lámpara

de la figura se usa para regular la corriente de carga y está conectado al circuito del acumulador para su carga.

Reóstatos de clavijas. Denominados frecuentemente cajas de resistencia (fig. 360), representan un juego de resistencias comprobadas exactamente. Los extremos de las bobinas de resistencia *1* se conectan a la placa de cobre *2*, dividida en secciones. Cuando en la escotadura de la placa *2* se inserta una clavija de cobre *3*, ésta une dos secciones

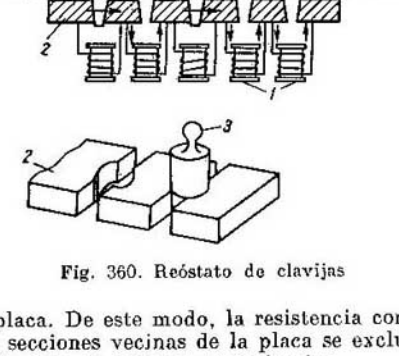


Fig. 360. Reóstato de clavijas

vecinas de la placa. De este modo, la resistencia conectada con sus extremos a las secciones vecinas de la placa se excluye del circuito o, como suele decirse, se pone en cortocircuito.

Con la clavija sacada, la corriente eléctrica pasa por la bobina de resistencia.

Las cajas de resistencias permiten incluir fácilmente al circuito resistencias de magnitudes exactamente determinadas y se emplean en las mediciones eléctricas.

§ 176. Medición de la potencia eléctrica activa

1. Corriente continua. De la fórmula de potencia de corriente continua

$$P = UI$$

se ve, que la potencia se puede determinar multiplicando las indicaciones del amperímetro por las del voltímetro. Pero en la práctica la potencia se mide generalmente por medio de instrumentos especiales: vatímetros. Analicemos el esquema de un vatímetro de sistema electrodinámico (fig. 361). El vatímetro consta de dos bobinas: la fija *1*, que consta de un pequeño número de espiras de alambre grueso, y la móvil *2*, armada de un gran número de espiras de alambre fino. Al conectar el vatímetro, la corriente de carga pasa por la bobina

fija, conectada en serie al circuito, y la bobina móvil se conecta en paralelo con el consumidor. Para disminuir la potencia que se consume en el devanado paralelo y aliviar el peso de la bobina móvil, se intercala en serie con ésta una resistencia adicional *3* de manganina. Como resultado de la acción recíproca de los campos magnéticos de las bobinas móvil y fija, surge un par proporcional a las corrientes de ámbas bobinas:

$$M = c_1 I_1 I_2.$$

La corriente del devanado paralelo es proporcional a la tensión del circuito, si la resistencia del circuito paralelo es constante. De aquí

$$M = c_1 I_1 U = c_2 P,$$

es decir, el par del instrumento es proporcional a la potencia que se consume en el circuito.

Para que la aguja del instrumento se desvíe desde el cero hacia la derecha, es necesario hacer pasar la corriente a través de la bobina en una dirección determinada.

Con este fin se designan con el signo * y se unen eléctricamente dos bornes que indican los terminales de los devanados. En la escala

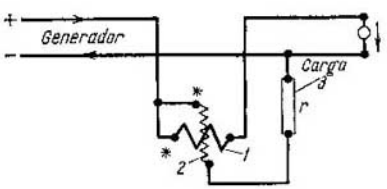


Fig. 361. Esquema de funcionamiento de un vatímetro electrodinámico

del vatímetro se indica la corriente nominal y la tensión nominal del instrumento. Así, por ejemplo, si en la escala del instrumento está indicado 5 A y 150 V, quiere decir que puede medir una potencia de hasta 750 W. Las escalas de algunos vatímetros están divididas. Si, por ejemplo, un vatímetro para 5 A y 150 V tiene 150 divisiones, esto significa que el valor de una división, o la constante del vatímetro, es igual a $\frac{750}{150} = 5$ W/div.

Para medir la potencia en los circuitos de corriente continua, además de vatímetros electrodinámicos, también se emplean los de sistema ferrodinámico.

2. Corriente alterna monofásica. Al conectar un vatímetro electrodinámico al circuito de corriente alterna, los campos magnéticos de las bobinas móvil y fija, actuando entre sí, harán girar la

bobina móvil. El par instantáneo de la parte móvil del instrumento es proporcional al producto de los valores instantáneos de las corrientes en ambas bobinas. Pero debido a las rápidas variaciones de las corrientes, el sistema móvil no puede seguirlas y el par del instrumento será proporcional a la potencia media o activa $P = U \cdot I \cos \varphi$.

Por consiguiente, según el ángulo de giro de la parte móvil del vatímetro se puede juzgar sobre la magnitud de la potencia activa que consume el circuito.

Para medir la potencia de la corriente alterna se usan también vatímetros de sistema de inducción. En la fig. 362 se muestra el

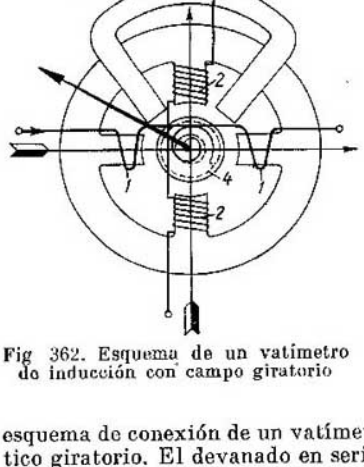


Fig 362. Esquema de un vatímetro de inducción con campo giratorio



Fig. 363. Conexión del vatímetro mediante transformadores de medición

esquema de conexión de un vatímetro de inducción con campo magnético giratorio. El devanado en serie 1 — 1 compuesto de un pequeño número de espiras de alambre grueso se coloca sobre dos polos salientes opuestos y se conecta en serie al circuito. El devanado paralelo 2—2 del vatímetro, que consta de un gran número de espiras de alambre fino, está puesto sobre dos polos salientes independientes. Al devanado 2—2 se le conecta en serie una resistencia inductiva *3*, que sirve para obtener un desfasamiento de 90° entre su tensión y su corriente. De este modo, siendo la carga puramente activa, logramos un desfasamiento de 90° entre las corrientes en los devanados en serie y en paralelo, lo que es condición imprescindible para crear un campo magnético giratorio. Al conectar el instrumento, este campo, atravesando el cilindro de aluminio *4*, induce en éste corrientes parásitas, las cuales, actuando recíprocamente con el campo, crean un par de arranque que influye sobre la parte móvil del instrumento. A cual-

quier carga, el ángulo barrido será proporcional a la potencia activa que consume el circuito:

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

El esquema de principio de un vatímetro de inducción con campo desplazable está representado en la fig. 335.

Para medir con vatímetros la potencia en redes de baja tensión con grandes intensidades de corriente se utilizan transformadores de intensidad. Para disminuir la diferencia de potenciales entre los devanados del vatímetro, los circuitos primario y secundario del transformador de intensidad tienen un punto común. El devanado secundario del transformador no se conecta a tierra, pues esto significaría la conexión a tierra de un conductor de la red.

Para obtener la potencia de la red P_1 es necesario multiplicar la indicación del vatímetro P_2 por la relación de transformación del transformador de intensidad k_i:

$$P_1 = P_2 k_i.$$

Para medir la potencia en las redes de alta tensión se usan transformadores de tensión y de intensidad (fig. 363). Para determinar la potencia de la red P_1 es necesario multiplicar la indicación del vatímetro P_2 por el producto de las relaciones de transformación de los transformadores de tensión y de intensidad

$$P_1 = P_2 k_t \cdot k_i.$$

Así, por ejemplo, si conectando al vatímetro un transformador de tensión de 6000/100 V y un transformador de intensidad de 150/5 A, el vatímetro indica 80 W, entonces la potencia de la red será igual a:

$$P_1 = 80 \cdot \frac{6.000}{100} \cdot \frac{150}{5} = 144\,000 \text{ W} = 144 \text{ kW}.$$

La conexión de los vatímetros (contadores) a través de transformadores de medida se debe efectuar de modo que la dirección de las corrientes que pasan por sus devanados sea la misma que en el caso de su conexión directa a la red.

La potencia de la corriente alterna monofásica se puede determinar no sólo mediante un vatímetro, sino por las indicaciones de tres instrumentos: amperímetro, voltímetro y fasímetro, según la fórmula:

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

3. Corriente alterna trifásica. Si la carga del sistema trifásico es uniforme, la potencia se mide empleando un vatímetro monofásico conectado según el esquema expuesto en la fig. 364 (*a* — para conexión en estrella, *b* — para conexión en triángulo). En este caso, por el devanado en serie del vatímetro pasa una corriente de fase, y el devanado en paralelo está conectado a la tensión de fase. Por eso

el vatímetro indicará la potencia de una fase. Para determinar la potencia de un sistema trifásico, es necesario multiplicar por tres la indicación del vatímetro monofásico.

En caso de carga variable, para medir la potencia en una red tetrafilar de corriente trifásica, se utilizan tres vatímetros (fig. 365).

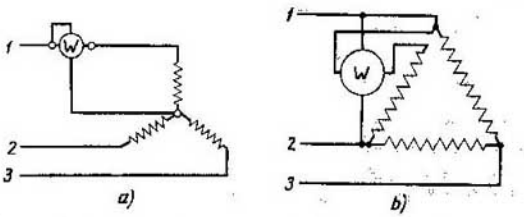


Fig. 364. Conexión de un vatímetro monofásico en caso de carga uniforme (sistema a tres hilos):
a — para conexión en estrella, *b* — para conexión en triángulo

Cada vatímetro monofásico mide la potencia de una fase. Para obtener la potencia del sistema trifásico hace falta sumar las indicaciones de los tres vatímetros.

Si la carga es variable, es difícil obtener una lectura simultánea de las indicaciones de los tres vatímetros. Además, tres vatímetros

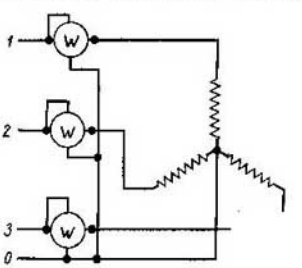


Fig. 365. Conexión de tres vatímetros monofásicos para medir la potencia de un circuito trifásico

monofásicos ocupan mucho espacio. Por eso, a menudo, se emplea un vatímetro trifásico de tres elementos, que es la unión de tres vatímetros monofásicos en un aparato. En el vatímetro electrodinámico de tres elementos, las tres bobinas móviles paralelas están asentadas sobre un eje, unido a la aguja, y el par total, obtenido al sumar los esfuerzos mecánicos de cada bobina, será proporcional a la potencia que se consume en la red trifásica. En otros tipos las bobinas móviles, dispuestas en distintos lugares, están unidas con tiras flexibles y transmiten el esfuerzo global al eje con la aguja.

Cuando la carga es uniforme, la potencia activa de la red trifásica se puede determinar con ayuda de tres instrumentos: amperímetro, voltímetro y fasímetro empleando la fórmula:

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi,$$

donde U e I = corriente de la línea y tensión compuesta de la red;
φ = ángulo de desfasamiento entre la tensión y la corriente de fase.

La potencia de una red trifásica trifilar con cualquier carga (uniforme o variable), independientemente del modo de conectar el consumidor (en estrella o en triángulo), puede ser medida por el esquema de dos vatímetros.

Según la primera ley de Kirchhoff la suma de valores instantáneos de las tres fases es igual a cero:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0,$$

de donde

$$i_2 = -i_1 - i_3.$$

La potencia instantánea de un sistema trifásico será:

$$p = i_1 u_1 + i_2 u_2 + i_3 u_3,$$

donde u con los exponentes son valores instantáneos de las tensiones de fase.

Sustituyendo en la última expresión el valor de la intensidad i_2, tendremos:

$$p = i_1 u_1 - i_1 u_2 - i_3 u_2 + i_3 u_3,$$

o bien,

$$p = i_1 (u_1 - u_2) + i_3 (u_3 - u_2).$$

La ecuación obtenida muestra que es necesario conectar uno de los vatímetros de modo que por su bobina de intensidad pase la corriente de la primera fase, y que la bobina de tensión se encuentre bajo la diferencia de tensiones de la primera y segunda fases; el otro vatímetro hay que conectarlo de modo que por su bobina de intensidad pase la corriente de la tercera fase, y que la bobina de tensión se encuentre bajo la diferencia de tensiones de la tercera y segunda fases.

Sumando las indicaciones de ambos vatímetros obtendremos la potencia de las tres fases.

En la fig. 366 están representadas tres variantes de conexión de dos vatímetros.

En los esquemas de la fig. 366 se ve que los devanados en serie de los vatímetros se conectan a dos cualesquiera conductores de la línea. Los comienzos de los devanados en paralelo de cada vatímetro se conectan al conductor, al cual está unido el devanado en serie del vatímetro. Los terminales de los devanados en paralelo se conectan al tercer conductor de la línea.

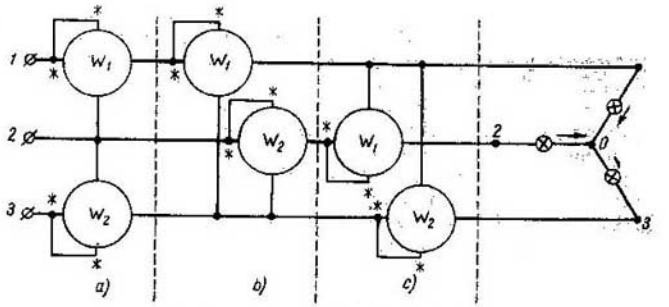


Fig. 366. Conexión de dos vatímetros

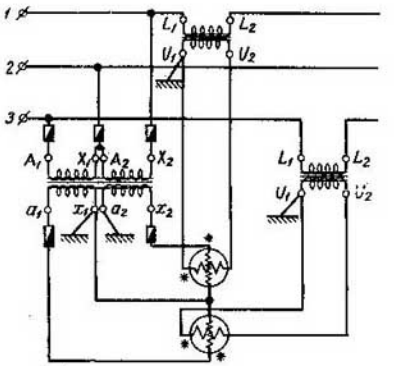


Fig. 367. Medición de la potencia según el esquema de dos vatímetros mediante transformadores de medición

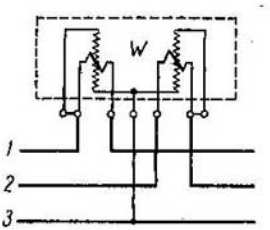


Fig. 368. Esquema de conexión de un vatímetro trifásico de dos elementos

Cuando la carga activa es uniforme (cos $\varphi = 1$), las indicaciones de los vatímetros son iguales. Si el cos φ no es igual a la unidad, las indicaciones de los vatímetros no serán iguales. Si el cos φ es igual a 0,5, uno de los vatímetros indicará cero. Si el cos φ es menor que 0,5, la aguja de dicho instrumento se desviará a la izquierda. Para obtener las indicaciones del instrumento es necesario cambiar la conexión de los extremos de sus devanados en serie o en paralelo.

Para medir la potencia activa del sistema trifásico, según las indicaciones de dos vatímetros, éstas hay que sumarlas o sustraer de la indicación de un vatímetro la negativa del otro. El esquema para medir la potencia con dos vatímetros por medio de transformadores de tensión e intensidad se da en la fig. 367.

Es más cómodo medir la potencia con ayuda de un vatímetro trifásico en el cual están combinados dos instrumentos conectados según el esquema de dos vatímetros, y que actúan sobre un eje común al que está acoplada la aguja. En los instrumentos de sistemas electrodinámico o ferrodinámico dos bobinas móviles, dispuestas sobre un eje o acopladas con tiras flexibles, hacen girar el eje. En los instrumentos de sistema inductivo dos elementos hacen girar dos discos asentados sobre un eje o dos elementos actúan sobre un disco. El esquema de conexión de un vatímetro trifásico de dos elementos se muestra en la fig. 368. En las redes de alta tensión el vatímetro trifásico se conecta mediante transformadores de tensión y de intensidad.

§ 177. Medición de la energía eléctrica activa

1. Corriente continua. Para medir el gasto de energía en circuitos de corriente continua se emplean contadores de tres sistemas: electrodinámico, magnetoeléctrico y electrolítico. Los contadores de sistema electrodinámico han adquirido mayor difusión (fig. 369). Las bobinas de intensidad fijas 1-1 compuestas de un pequeño número de espiras de alambre grueso están conectadas en serie a la red. Una bobina móvil de forma esférica, que se denomina aquí inducido, 2, está fija sobre un eje que puede girar sobre pivotes. El devanado del inducido tiene gran número de espiras de alambre fino y está dividido en varias secciones. Los extremos de las secciones están soldados a las delgas del colector 3, el cual está en contacto con las escobillas metálicas planas 4. La tensión de la red se suministra al devanado del inducido a través de una resistencia adicional 7. Durante el funcionamiento del contador, debido a la acción recíproca de la corriente en el devanado del inducido y del flujo magnético de las bobinas de intensidad fijas, se crea un par de arranque M_{arr} bajo cuya influencia el inducido comienza a girar. Puesto que en determinados momentos el colector conectará a la tensión de la red las secciones consecuentes del devanado del inducido, éste conservará la dirección de rotación invariable, de donde se deduce que

$M_{arr} = c_1 \cdot i_{ind} \cdot \Phi$. Pero, ya que $i_{ind} = U$, y $\Phi = I$, entonces $M_{arr} = c_2 \cdot UI = c_2 P$, de donde se ve, que el par de arranque del contador es proporcional a la potencia que se consume en la red. Sobre el eje del contador está asentado un disco de aluminio *5*, que gira en el campo del imán permanente *6*. Como resultado de esto, las corrientes parásitas que surgen en el disco interactúan con el campo del imán y crean un par de frenado M_f proporcional a la velocidad del disco:

$$M_f = c_3 n.$$

Cuando la velocidad de rotación es constante, los pares de arranque y de frenado son iguales entre sí:

$$M_{arr} = M_f,$$

o bien,

$$c_2 P = c_3 n,$$

de donde

$$P = \frac{c_3}{c_2} n = cn,$$

es decir, la velocidad de rotación del contador es proporcional a la potencia de la red. Estudiando la construcción de un contador electrodinámico podemos notar que su funcionamiento recuerda el de un motor de corriente continua con excitación en derivación. La misión del colector en el contador es la misma que en los motores de corriente continua.

La cantidad de potencia que consume la red se puede determinar por el número de revoluciones hechas por el inducido (disco). Por medio de una transmisión dentada o de tornillo sin fin, la rotación del eje se comunica al mecanismo contador; en este caso la transmisión se elige de modo que el mecanismo contador señale el consumo de energía en hectovatios-hora o kilovatios-hora.

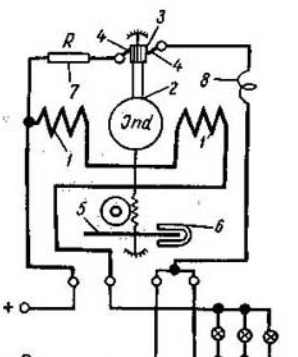


Fig. 369. Esquema de un contador electrodinámico de corriente continua

La cantidad de energía que corresponde a una vuelta del inducido se denomina **constante del contador**. El número de revoluciones del inducido que corresponde a la unidad de energía eléctrica tomada como patrón se denomina **relación de transmisión**. Para comprobar el contador, en su tablero se indica la constante del contador o la relación de transmisión.

Ejemplo 3. En el tablero del contador está indicado: «1 kilovatio-hora = = 12.000 revoluciones del inducido». Al comprobar el contador su disco hizo

120 revoluciones en 50 seg. Determinar la potencia que consume la red, 1 kWh = = 1.000 Wh = 3.600.000 W- seg.

La constante del contador es igual a:

$$\frac{3.600.000}{12.000} \text{ W-seg/rev.}$$

La energía durante 120 revoluciones:

$$\frac{3.600.000 \times 120}{12.000} \text{ W-seg.}$$

La potencia que consume la red:

$$\frac{3.600.000 \times 120}{12.000 \times 50} = 720 \text{ W.}$$

Para compensar el rozamiento dentro del contador, se conecta en serie con el devanado del inducido una bobina adicional *8* (fig. 369), el campo magnético de ésta, interactuando con la corriente en el devanado del inducido, crea un par adicional que compensa la influencia del rozamiento.

2. **Corriente alterna monofásica.** Para medir la energía activa en circuitos de corriente alterna monofásica se emplean contadores inductivos. La estructura de un contador inductivo es casi la misma

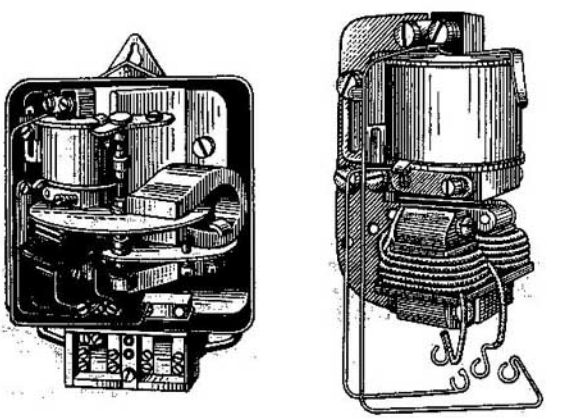


Fig. 370. Vista interior de un contador inductivo de corriente monofásica (a la izquierda) y vista general de conductor-magnético con las bobinas del contador (a la derecha)

que la de un vatímetro inductivo. La diferencia consiste en que el contador no tiene muelles que crean un par antagónico, debido a lo cual, el disco del contador puede girar libremente. La aguja

y la escala del vatímetro están sustituidas en el contador por un mecanismo contador. El imán permanente, que sirve en el vatímetro para el amortiguamiento, crea en el contador un par de freno. El

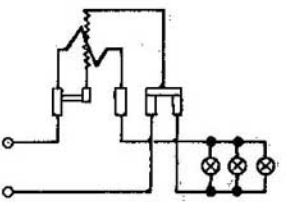


Fig. 371. Esquema de conexión de un contador monofásico a la red

aspecto exterior de un contador monofásico inductivo se muestra en la fig. 370, y el esquema de su conexión en la fig. 371.

3. **Corriente alterna trifásica.** La energía activa de la corriente alterna trifásica se puede medir con ayuda de dos contadores monofásicos conectados a la red según el esquema análogo al de dos vatímetros. Es más cómodo medir la energía mediante un contador trifásico de energía activa que combina en un instrumento el trabajo de dos contadores monofásicos. El esquema de conexión de un contador trifásico de dos elementos de energía activa es el mismo que el del vatímetro correspondiente.

Para medir la energía activa en una red tetrafilar de corriente trifásica se emplea un esquema análogo al de tres vatímetros o se utiliza un contador trifásico de tres elementos. El cálculo de la energía según las indicaciones de los contadores conectados, de acuerdo con los esquemas mencionados más arriba, se realiza igual que el de la potencia según los mismos esquemas.

En las redes de alta tensión, la conexión de los contadores se efectúa a través de transformadores para medir la tensión y la intensidad de corriente.

§ 178. Medición de la energía reactiva

1. **Corriente alterna monofásica.** La energía reactiva de la corriente monofásica se puede determinar por las indicaciones del amperímetro, voltímetro, fasímetro y segundero. Conociendo la magnitud del cos φ hallamos en las tablas trigonométricas el valor del sen φ, e introduciendo en la fórmula

$$A_r = UIt \operatorname{sen} \varphi$$

los valores numéricos, determinamos la magnitud de la energía reactiva.

Los contadores especiales de energía reactiva de corriente monofásica, llamados contadores «sinusoidales», no han tenido difusión.

2. **Corriente alterna trifásica.** Para calcular la energía reactiva en las redes de corriente trifásica, se puede emplear contadores comunes y corrientes de energía activa y contadores especiales de energía reactiva.

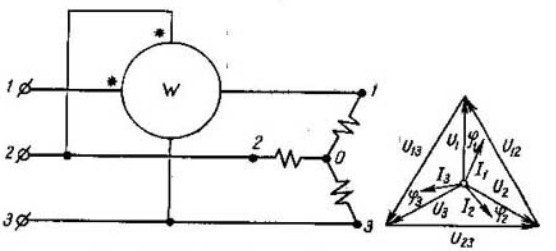


Fig. 372. Esquema de medición de la energía reactiva mediante un contador monofásico de energía activa

Cuando la carga del sistema trifásico es uniforme para medir la energía reactiva se puede utilizar un contador monofásico ordinario de energía activa conectado según el esquema de la fig. 372. Por el devanado en serie del contador pasa la corriente de la primera

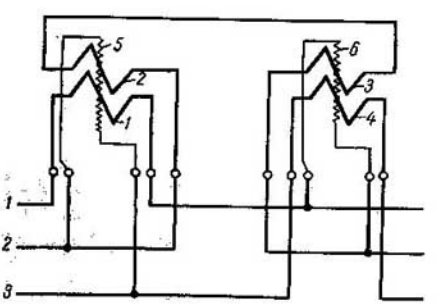


Fig. 373. Esquema de un contador trifásico de energía reactiva tipo ИР de sistema electrodinámico

fase I_1, y el devanado en paralelo del mismo está conectado a la tensión compuesta U_{23} que está desfasada 90° respecto a la tensión de fase U_1; la tensión U_{23} es $\sqrt{3}$ veces mayor que U_1 (véase el dia-

grama vectorial en la fig. 372, a la derecha); entonces

$$A_r = U_{23} I_1 t \cos (90° - \varphi_1) = \sqrt{3}\, U_1 I_1 t \operatorname{sen} \varphi_1.$$

El contador registrará la energía reactiva de la primera fase aumentada $\sqrt{3}$ veces.

Para calcular la energía reactiva de todo el sistema trifásico es necesario aumentar $\sqrt{3}$ veces la indicación del contador.

Ahora estudiemos la construcción de un contador trifásico especial de energía reactiva. La construcción de un contador del tipo mencionado es la misma que la de un vatímetro trifásico. Los devanados en paralelo de los dos elementos se conectan a la red según el esquema representado en la fig. 373. Sobre los núcleos en U no se arrollan dos, sino cuatro devanados en serie. Sobre uno de los apéndices del núcleo del primer elemento se arrolla un devanado en serie *1*. El segundo devanado de corriente *2* se coloca en el segundo apéndice del núcleo del primer sistema, y el tercer devanado de corriente *3* se coloca sobre el primer apéndice del segundo sistema. El cuarto devanado de corriente *4* se arrolla sobre el segundo apéndice del núcleo en U del segundo elemento. Los devanados de tensiones *5* y *6* están conectados como se indica en el esquema. Al conectar un contador reactivo hay que observar el orden de sucesión de las fases.

§ 179. Medición del factor de potencia

La magnitud del factor de potencia en las redes de corriente alterna monofásica se puede determinar por las indicaciones del voltímetro, amperímetro y vatímetro con ayuda de la fórmula:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}.$$

Por medio de los mismos instrumentos, el factor de potencia en las redes de corriente trifásica con carga uniforme, se puede determinar por la fórmula:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}\, UI},$$

donde U e I = tensión e intensidad de la red, y φ = ángulo de desfasamiento entre la tensión e intensidad de fase.

El valor medio del factor de potencia, $\cos \varphi_{med}$ durante un plazo determinado de tiempo se puede determinar por las indicaciones de los contadores activo y reactivo durante el mismo tiempo por medio de la fórmula:

$$\cos \varphi_{med} = \frac{A_a}{\sqrt{A_a^2 + A_r^2}},$$

donde A_a = energía activa;
A_r = energía reactiva,

o determinando

$$\operatorname{tg} \varphi_{med} = \frac{A_r}{A_a}$$

el $\cos \varphi_{med}$ se encuentra por tablas trigonométricas.

Sin embargo, frecuentemente, el factor de potencia se determina mediante instrumentos especiales, fasímetros (fig. 374,*a*). Estudiemos

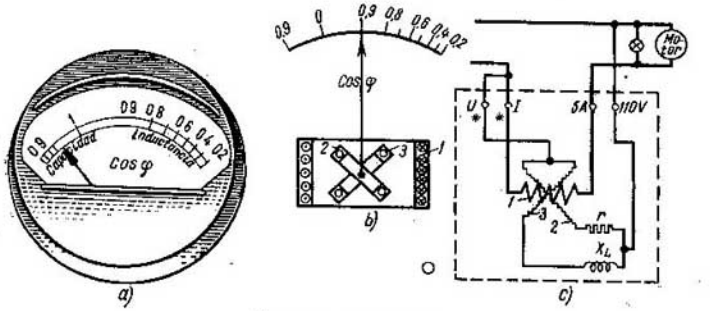


Fig. 374. Fasímetro:
a — aspecto general, *b* — esquema, *c* — esquema de uniones interiores y conexiones a la red

la construcción de un fasímetro monofásico electrodinámico (fig. 374,*b* y *c*). El instrumento consta de una bobina fija *1* conectada en serie a la red, y de dos bobinas móviles *2* y *3* asentadas sobre un eje y dispuestas en un ángulo de 90° entre sí. Los devanados de estas bobinas tienen gran número de espiras de alambre fino y están conectados en paralelo a la red. La bobina *2* está conectada en serie con la resistencia activa R, y su intensidad i_2 coincide en fase con la tensión de la red. La bobina *3* está conectada en serie con una gran reactancia inductiva x_L y su intensidad i_3 se atrasa 90° respecto a la tensión de la red.

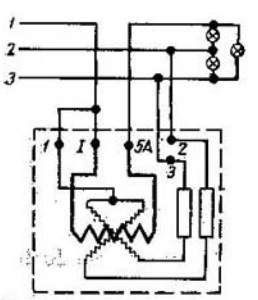


Fig. 375. Esquema de uniones interiores y conexiones a la red de un fasímetro trifásico

El par que desarrolla la bobina *2* es proporcional a la potencia activa de la red (igual que en un vatímetro electrodinámico); el par de la bobina *3* es proporcional a la potencia reactiva de la red. Las bobinas están conectadas de modo que sus pares son opuestos. La posición espacial de la parte móvil del fasímetro, que se determina por el ángulo de giro de las bobinas *2* y *3*, depende del desfasamiento φ

entre la tensión y la intensidad. Por eso la escala del instrumento se puede graduar directamente en valores del factor de potencia $\cos \varphi$.

El fasímetro no tiene muelles para crear un par antagónico y por eso, al desconectar el instrumento, la aguja ocupa cualquier posición. El instrumento dispone de una escala bilateral. La parte derecha da la escala de el valor del factor de potencia en caso de carga inductiva, la izquierda, en caso de carga capacitativa.

El esquema de un fasímetro trifásico electrodinámico está expuesto en la fig. 375. El desfasamiento entre las intensidades en las bobinas móviles se obtiene no por la selección de resistencias activas y reactancias inductivas, sino mediante la conexión correspondiente de las bobinas a la red trifásica.

§ 180. Medición de resistencias

1. Método de amperímetro y voltímetro. En circuitos de corriente continua la medición de la resistencia se puede efectuar según los esquemas representados en la fig. 376. Conociendo la caída de tensión en el sector del circuito y la corriente que pasa por éste, se puede calcular su resistencia.

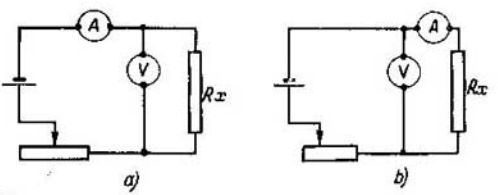


Fig. 376. Medición de las resistencias por medio del amperímetro y el voltímetro

En el esquema *a*, por el amperímetro fluirá la suma de corrientes de la resistencia a determinar y del voltímetro. La resistencia puede ser determinada en este caso por la fórmula:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{I - I_v} = \frac{U_x}{I - \frac{U_x}{R_v}},$$

donde I_v y R_v = corriente y la resistencia del voltímetro.

En el esquema *b*, el voltímetro indicará la caída de tensión en la resistencia a determinar y en el devanado del amperímetro:

$$U = U_x + U_a,$$

donde U_a = caída de tensión en el devanado de amperímetro. La resistenca que se busca se determina por la fórmula:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U - U_a}{I_x} = \frac{U - I_x R_a}{I_x},$$

donde R_a = resistencia del devanado del amperímetro.

El primer esquema (fig. 376,*a*) se emplea para determinar pequeñas resistencias que son considerablemente menores que la resistencia del devanado del voltímetro. Con el segundo esquema (fig. 376,*b*) se determina la magnitud de grandes resistencias, puesto que es posible despreciar la resistencia del devanado del amperímetro R_a.

Cuando la corriente es alterna se puede determinar la magnitud de la impedancia z del consumidor por las indicaciones del amperímetro y del voltímetro de acuerdo a la fórmula:

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

Si conectamos el mismo consumidor al circuito de corriente continua se puede determinar la resistencia activa por las indicaciones del amperímetro y voltímetro.

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

si no tomamos en consideración el efecto pelicular.

La resistencia activa en el circuito de corriente alterna también se puede hallar directamente por las indicaciones del vatímetro y del amperímetro, según la fórmula:

$$R = \frac{P}{I^2}.$$

Por la fórmula

$$x = \sqrt{z^2 - R^2}$$

determinamos la magnitud de la reactancia del consumidor.

Señalemos que no se puede determinar el x, únicamente por las indicaciones del amperímetro, voltímetro y vatímetro.

2. **Puente de Wheatstone.** En la fig. 377 se muestra el esquema de un puente de resistencias. La batería *1* suministra tensión, a través del interruptor *2*, a los puntos *A* y *C* del puente. El galvanómetro *4* se conecta a la otra diagonal del puente a través del interruptor *3*. La resistencia desconocida R_x está conectada entre los puntos *A* y *B*. Eligiendo las resistencias R_a, R_b y R se logra que al ser cerrado el interruptor *3* el galvanómetro indique cero. Hay que señalar, que los métodos de mediciones de puente o de cero son los más precisos. En este caso el potencial del punto *B* es igual al del punto *D*. Por consiguiente:

$$U_{AD} = U_{AB} = I_a R_a = I_x R_x;$$
$$U_{DC} = U_{BC} = I_b R_b = I_r R.$$

Dividiendo los miembros de las igualdades entre sí obtendremos:

$$\frac{I_a R_a}{I_b R_b} = \frac{I_x R_x}{I_r R}.$$

Puesto que $I_a = I_b$ e $I_x = I_r$ (la corriente no pasa a traves del galvanómetro), entonces, reduciendo, obtenemos:

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_x}{R},$$

de donde

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} R.$$

En calidad de resistencias R_a, R_b y R se utilizan cajas de resistencias.

En la fig. 378 está representado otro esquema de puente de resistencias. Entre los puntos A y C está tendido un alambre calibrado por el cual se desliza el contacto D. Entre los puntos C y B está

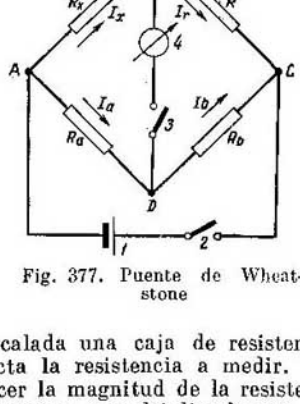


Fig. 377. Puente de Wheatstone

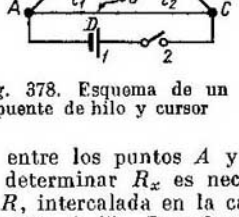


Fig. 378. Esquema de un puente de hilo y cursor

intercalada una caja de resistencias, entre los puntos A y B se conecta la resistencia a medir. Para determinar R_x es necesario conocer la magnitud de la resistencia R, intercalada en la caja de resistencias, y multiplicarla por la relación R_a/R_b. La relación de resistencias en este esquema del puente se sustituye por la de longitudes de sectores de alambre calibrado l_1/l_2, que se indica en la escala del puente.

Al medir la resistencia de conductores líquidos, el fenómeno de polarización altera considerablemente los resultados de las mediciones. Por eso, para emplear el puente de resistencia, se alimenta con corriente alterna, que se obtiene de una bobina de inducción, dotada de un ruptor y conectada a una fuente de corriente continua.

Las pequeñas resistencias (menores de 1 ohmio) no se pueden medir por medio de puentes de Wheatstone, ya que las resistencias de los conductores de unión y de los contactos influyen sobre el resultado de las mediciones.

Para medir pequeñas resistencias (devanados de inducidos de las máquinas de corriente continua, devanados de polos de las máquinas con excitación en serie, etc.) se utilizan los así llamados puentes dobles.

3. **Puente doble (de Kelvin).** El esquema de este puente está representado en la fig. 379. Aquí R_x es la resistencia desconocida; R_N es la resistencia patrón conocida; m, n, m', n' son cajas de resistencias. Generalmente se toma $m = m'$ y $n = n'$. A los puntos C y D

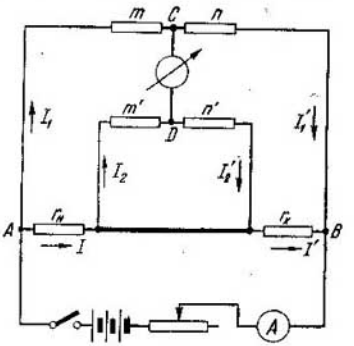


Fig. 379. Esquema de un puente doble

está conectado un galvanómetro. Al conectar el interruptor de cuchilla en el circuito de la batería suministramos tensión a los puntos A y B del esquema. Seleccionando las resistencias m, m', n, n' (conservando $m = m'$ y $n = n'$) logramos que la aguja del galvanómetro se ponga en cero. En este caso $I_1 = I_1'$; $I = I'$ e $I_2 = I_2'$.

Según la segunda ley de Kirchhoff tenemos: para el circuito $ACDA$

$$I_1 m - I_2 m' - I R_N = 0,$$

o bien,

$$I R_N = I_1 m - I_2 m'$$

para el circuito $CBDC$

$$I_1' n - I' R_x - I_2' n' = 0,$$

despejando $I' R_x$,

$$I' R_x = I_1' n - I_2' n'.$$

Dividiendo entre sí los miembros de las igualdades, obtendremos:

$$\frac{IR_N}{I'R_x} = \frac{I_1 m - I_2 m'}{I_1' n - I_2' n'}.$$

Tomando en cuenta que $m = m'$ y $n = n'$, tendremos:

$$\frac{R_N}{R_x} = \frac{(I_1 - I_2)\, m}{(I_1' - I_2')\, n} = \frac{m}{n}.$$

De donde se deduce que

$$R_x = R_N \frac{n}{m}.$$

Las resistencias de transición en los contactos y las resistencias de los conductores de unión no influyen en la precisión de la medición, según veremos a continuación.

Al alcanzar el punto A, la corriente de la batería se bifurca en corrientes I e I_1. Las corrientes I e I_1 encuentran en su camino las resistencias de los cables de unión, las resistencias de los contactos de transición, las cuales están unidas en serie con las resistencias de las cajas m, n, m' y n', y por eso todas se suman. Pero, puesto que las resistencias m, n, m' y n'' son de 10 ohmios o más, es decir, considerablemente mayores que las de los cables de unión y de los contactos de transición y, además, las resistencias n y m forman parte de la fórmula $R_x = R_N \frac{n}{m}$ como relación, entonces la influencia de las resistencias de los conductores de unión y de los contactos de transición es prácticamente nula.

Para aumentar la precisión de mediciones, el conductor que une las resistencias R_N y R_x debe tener una resistencia muy pequeña.

4. **Megóhmetros.** Los megóhmetros sirven para medir la resistencia del aislamiento de las diferentes partes de las instalaciones electrotécnicas con relación a la «tierra» y de unas partes respecto a otras.

Según las normas, la resistencia de aislamiento de los conductores no ha de ser menor de 1.000 ohmios por cada voltio de la tensión de servicio. Así, por ejemplo, para una red con tensión de servicio de 220 V, la resistencia del aislamiento no debe ser menor de 220.000 ohmios, es decir, 0,22 megohmios MΩ.

La medición de la resistencia del aislamiento se debe realizar mediante una tensión, en lo posible, igual a la de servicio y, en todo caso, no menor de 100 V.

Los megóhmetros, cuyas indicaciones dependen de la tensión, constan de un generador y de un aparato de medición. Si en un circuito intercalamos en serie una resistencia regulable R, las indicaciones del aparato de medición (voltímetro) dependerán de la magnitud de esta resistencia (siendo constante la tensión del circuito). Cuando $R = 0$, la indicación del voltímetro será máxima, cuando $R = \infty$.

el voltímetro estará en el cero. Conectando al circuito distintas resistencias se puede graduar la escala del medidor directamente en ohmios (kilohmios, megohmios). En lo sucesivo se puede aplicar este instrumento para medir resistencias, empleando una fuente de energía con tensión igual a la usada durante la graduación.

En la fig. 380 está representado el esquema de un megóhmetro para comprobar el aislamiento tipo МПИ. Un generador de corriente

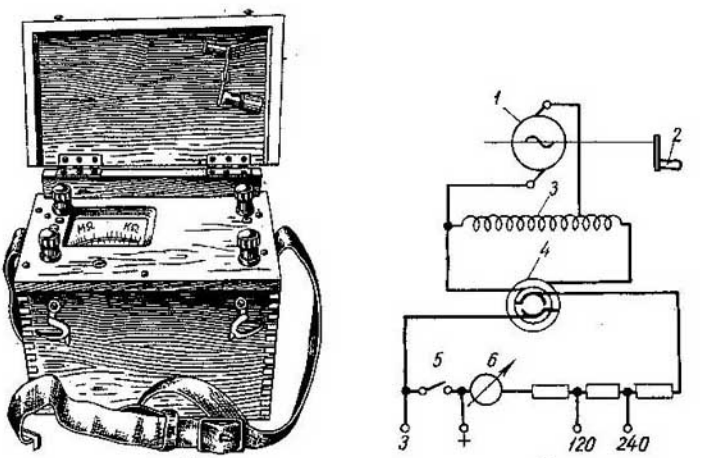


Fig. 380. Megóhmetro МПИ:
a — aspecto general, *b* — esquema eléctrico

alterna *1* se pone en movimiento mediante el manubrio *2*. El generador suministra la tensión al autotransformador elevador *3* que aumenta la tensión del generador hasta 400 V. Mediante un dispositivo rectificador *4* la tensión alterna se transforma en continua. Para medir el aislamiento del conductor, el borne *3* se conecta a tierra, al borne «+» se conecta el hilo de cobre del conductor y, apretando el botón *5*, se dan vueltas al manubrio del generador con una velocidad tal que haga desviar la aguja *6* del instrumento hasta el tope. Después, soltando el botón, se lee la resistencia del aislamiento en la escala del instrumento. Mediante este instrumento se puede medir también tensiones de corriente continua de 120 y 240 V. Su gran defecto es la dependencia de las indicaciones de la velocidad de rotación del generador. Estudiemos otra construcción del megóhmetro, en el cual la variación de la velocidad de rotación del generador no se refleja en las mediciones.

En la fig. 381 se da el esquema de un megóhmetro tipo MOM de la fábrica «Electropribor». La parte móvil del instrumento son dos bobinas *1* y *2* asentadas sobre un eje y dispuestas en el campo de un imán permanente a 90° una respecto a otra. Un generador de 500 V (si el manubrio gira con una velocidad de 120 r. p. m.) suministra tensión a ambas bobinas a través de conductores especiales. En serie con una bobina se conecta una resistencia constante (o varias resistencias para ampliar los límites de medición). En serie

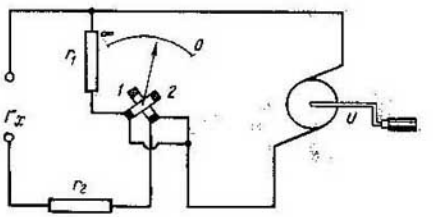


Fig. 381. Esquema del megóhmetro MOM

con la otra bobina se introduce la resistencia desconocida, cuya magnitud se debe medir. Las corrientes, pasando por ambas bobinas e interactuando con el campo magnético, crean pares de arranque contrarios.

Sobre un conductor con corriente dispuesto en un campo magnético actúa una fuerza

$$F = BIl \operatorname{sen} \alpha.$$

El par M_{arr} que actúa sobre la bobina, que consta de w espiras y tiene una anchura b y longitud l, aproximadamente igual a la longitud activa de la bobina, será:

$$M_{arr} = 2BIlw \frac{b}{2} \operatorname{sen} \alpha,$$

donde α = ángulo entre la perpendicular al plano de la bobina y la dirección del campo magnético.

Puesto que $l \cdot b$ es el área de la bobina S, entonces

$$M_{arr} = BISw \operatorname{sen} \alpha.$$

Sobre las bobinas del megóhmetro actuarán los pares de arranque:

$$M_1 = w_1 SB \operatorname{sen} \alpha I_1;$$
$$M_2 = w_2 SB \cos \alpha I_2.$$

En la posición de equilibrio $M_1 = M_2$, de donde

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{w_2 I_2}{w_1 I_1} = c \frac{I_2}{I_1} = c \frac{R_1}{R_2 + R_x}.$$

El ángulo de giro de la parte móvil del instrumento depende de la relación de corrientes en las bobinas y no de la tensión aplicada del generador. Conociendo c, R_1, R_2 y el ángulo α, determinamos R_x.

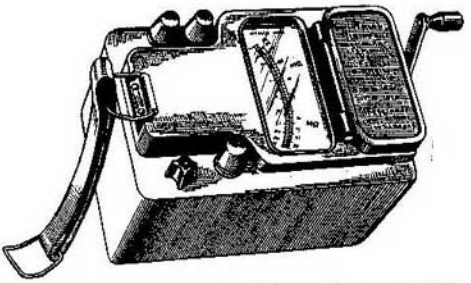


Fig. 382. Aspecto exterior del megóhmetro M-1101

El cambio de la velocidad del manubrio en amplios límites (de 60 a 180 r.p.m.) no influye en la exactitud de las mediciones.

En la fig. 382 se muestra el aspecto exterior de un megóhmetro magnetoeléctrico portátil M-1101.

Problemas

1. El instrumento indica 9,9 A. El valor real de la corriente es de 10 A. Determinar los errores y la corrección. La escala del instrumento es para 20 A.

2. Determinar la resistencia de un shunt para un amperímetro con resistencia interna de 0,016Ω, si se quiere aumentar cinco veces las indicaciones del instrumento.

3. Al amperímetro está conectado un shunt, cuya resistencia es 25 veces menor que la del instrumento. ¿Qué corriente pasa por el circuito, si el amperímetro indica 3 A?

4. Mediante un voltímetro para 15 V es necesario medir la tensión de 120 V. Determinar la magnitud de la resistencia adicional, si la resistencia interna del voltímetro es de 2000Ω.

5. Un frecuencímetro para 127 V dispone de una resistencia de 8000Ω. ¿Cuál debe ser la resistencia adicional para que este frecuencímetro se pueda conectar a la red de 220 V?

6. ¿Cuáles son los errores de un vatímetro monofásico que indica 60 W, siendo la tensión 120 V, la intensidad 0,6 A y el $\cos \varphi = 0{,}83$?

7. Un voltímetro está conectado a través de un transformador de 3.000/100 V. Determinar la tensión en las barras de alto voltaje, si el voltímetro ha indicado 95 V.

8. Un amperímetro conectado a través de un transformador de intensidad de 150/5 A, indica 4 A. Determinar la intensidad de corriente en el circuito primario.

9. Un amperímetro para 10 A, cuya escala tiene 100 divisiones, está conectado a través de un transformador de intensidad de 500/5 A. La aguja está en la 42ª división. Determinar la intensidad en el circuito primario del transformador.

10. Un vatímetro trifásico está conectado a través de transformadores de medición de 3.000/100 V y 50/5 A. Determinar la potencia del circuito primario, si la aguja del vatímetro indica 150 W.

11. Un vatímetro para 150 V, 5 A y con 150 divisiones está conectado a través de transformadores de medición de 3.300/100 V y 600/5 A. Determinar la potencia del circuito primario, si la aguja del vatímetro está en la 72ª división.

12. Un vatímetro monofásico para 150 V, 5 A y con 250 divisiones está conectado al sistema trifásico con carga uniforme a través de transformadores de medición de 500/100 V y 40/5 A. Determinar la potencia de la red trifásica si la aguja del vatímetro está en la división 50.

Preguntas de control

1. Formúlense las condiciones de equilibrio de la parte móvil de un instrumento eléctrico de medición.
2. ¿Cómo se puede dividir los instrumentos eléctricos de medición según el tipo de mediciones, tipo de corriente, principio físico, clase de precisión?
3. ¿Qué requisitos deben satisfacer los instrumentos eléctricos de medición?
4. ¿Cuál es la construcción de los instrumentos magnetoeléctricos de medición, sus ventajas, deficiencias y esfera de aplicación?
5. Lo mismo para los instrumentos del sistema electromagnético.
6. Lo mismo para los instrumentos del sistema electrodinámico.
7. Lo mismo para los instrumentos del sistema térmico.
8. Lo mismo para los instrumentos inductivos.
9. Lo mismo para los instrumentos del sistema termoeléctrico.
10. Lo mismo para los instrumentos del sistema detector.
11. Lo mismo para los instrumentos del sistema de resonancia.
12. ¿Qué signos convencionales llevan las escalas de los instrumentos eléctricos de medición?
13. ¿Con qué instrumentos se puede medir la potencia de corriente continua?
14. Trácense el esquema de conexión de un contador de corriente continua.
15. ¿Cómo medir la potencia de la corriente alterna?
16. Trácense el esquema de conexión del contador de corriente alterna monofásica.
17. Trácense el esquema de conexión de un vatímetro de tres elementos a la red de corriente trifásica.
18. Trácense el esquema de conexión de un vatímetro trifásico de dos elementos a la red de alta tensión.
19. ¿Cómo se puede medir la energía reactiva?
20. ¿Cómo se puede determinar el factor de potencia?
21. Trácense el esquema de conexión del contador trifásico de energía reactiva.
22. Trácense el esquema de conexión del fasímetro electrodinámico a la red de alto voltaje de corriente trifásica.
23. ¿Cómo se puede medir la resistencia en las redes de corriente continua y alterna?
24. ¿Cómo se mide la resistencia del aislamiento de los conductores?

XV

ACCIONAMIENTO ELECTRICO

§ 181. Nociones generales

Toda máquina tiene una parte que al adquirir movimiento ejecuta mediante sus utensilios (herramientas) operaciones que antes los obreros realizaban a mano por medio de estas mismas herramientas.

La parte mencionada de la máquina se denomina mecanismo ejecutor. Para poner en movimiento un mecanismo ejecutor es necesario un motor y un mecanismo de transmisión. En calidad de motor se puede aprovechar: la fuerza del hombre (transmisión accionada a pedal de tornos, mollejones); la fuerza de animales (algunas máquinas agrícolas); la fuerza del viento, agua, vapor (molinos de viento, turbinas de agua y de vapor); motores de combustión interna (tractor, camión, avión); motor eléctrico. El mecanismo de transmisión puede incluir: árboles, poleas, engranajes, correas de transmisión, etc.

El motor y el mecanismo de transmisión ponen en movimiento el mecanismo ejecutor. Por eso estas dos partes de la máquina se denominan a c c i o n a m i e n t o.

Si para poner en movimiento una máquina se emplea un motor eléctrico, tal accionamiento se llama a c c i o n a m i e n t o e l é c t r i c o.

Se considera que el accionamiento eléctrico fue aplicado por primera vez en una lancha motora en 1838 por el académico B. Jacobi. En la lancha fue instalado un motor eléctrico alimentado por una batería galvánica. La lancha transportaba 11 pasajeros y se movía con una velocidad de 4 km/hora. Un regulador con motor de corriente continua para lámparas de arco fue propuesto en 1879 por V. Chikolev (1845—1898). Los problemas de producción, transmisión y distribución de la energía eléctrica fueron resueltos felizmente gracias a las obras de los electrotécnicos rusos P. Yablochkov, M. Dolivo-Dobrovolski e I. Usaguin.

P. Yablochkov hizo una gran aportación en la aplicación práctica de la corriente alterna. Un transformador inventado por

P. Yablochkov e I. Usaguin permitió transmitir la energía eléctrica a distancia. A la amplia implantación de la corriente alterna y su empleo industrial contribuyó mucho M. Dolivo-Dobrovolski que creó los sistemas trifásicos de corriente alterna.

La invención de un motor asincrónico trifásico en 1890 por Dolivo-Dobrovolski sirvió de potente impulso a una amplia difusión del accionamiento eléctrico en la industria de muchos países. Primero, paulatinamente, y después rápidamente, el accionamiento eléctrico sustituyó a otros tipos de accionamiento. La potencia de los motores eléctricos con relación a la potencia total de los motores instalados constituía: en 1890, 5%; en 1927, 75% y, actualmente, cerca del 100%.

Los accionamientos eléctricos que se utilizan en la industria se pueden dividir en tres tipos principales: de grupo, individual y polimotor.

El accionamiento eléctrico de grupo consta de un motor eléctrico que a través de una transmisión y un embrague pone en movimiento varios mecanismos ejecutores.

El embrague es un árbol corto que descansa sobre cojinetes. Sobre el árbol se hallan dispuestas poleas escalonadas, polea de trabajo (unida con el árbol) y de marcha en vacío (asentada libremente sobre el árbol). El embrague permite cambiar la velocidad de rotación del torno (mediante la polea escalonada), parar y arrancarlo (mediante la polea de trabajo o de marcha en vacío). Al parar el motor dejan de funcionar todos los mecanismos ejecutores que reciben de éste energía mecánica. Cuando funciona sólo una parte de los mecanismos ejecutores, el accionamiento de grupo tiene un rendimiento bajo.

El accionamiento eléctrico individual está compuesto de un motor eléctrico que pone en movimiento un mecanismo ejecutor independiente.

Con el accionamiento individual están equipadas taladradoras de un husillo, tornos de baja potencia, etc. Al principio, la transmisión de movimiento desde el motor al torno se realizaba mediante un embrague. Posteriormente se modificó el motor eléctrico y se acopló conjuntamente al mecanismo ejecutor.

El accionamiento polimotor, como su nombre lo indica, consta de varios motores eléctricos, cada uno de los cuales sirve para poner en movimiento elementos determinados del mecanismo ejecutor. Los accionamientos polimotor se utilizan para máquinas herramienta de gran potencia, trenes de laminado, máquinas productoras de papel, grúas y otras máquinas y mecanismos. Como ejemplo, examinemos el accionamiento de una taladradora radial. La máquina es servida por cuatro motores. Un motor pone en movimiento el husillo, otro, eleva y baja el brazo con el husillo, el tercero, hace girar el brazo alrededor del eje vertical y, el cuarto proporciona la taladrina a la broca.

Las grúas de puente tienen tres motores. El motor de elevación que eleva y baja las cargas, el motor del carro que lo desplaza a lo largo del chasis de la grúa, y el motor del puente que desplaza la grúa a lo largo del taller.

§ 182. Características de los motores eléctricos

Según el tipo de corriente, los accionamientos eléctricos se dividen en accionamientos de corriente continua y de corriente alterna. De acuerdo con el modo de conectar los devanados inductor y del inducido se distinguen los motores de corriente continua con excitación en serie, en paralelo y compuesta (compound).

Anteriormente hemos estudiado los motores sincrónicos y asincrónicos de corriente alterna. Recordemos, que los motores sincrónicos se excitan con corriente continua desde una excitatriz. La velocidad de rotación de estos motores depende de la frecuencia de la corriente alterna. Cuando la frecuencia de corriente es constante, la velocidad del motor también lo es.

Los motores asincrónicos se excitan por intermedio del circuito primario alimentado con corriente alterna. El número de revoluciones de los motores asincrónicos varía de acuerdo con la magnitud de la carga.

El funcionamiento del motor se caracteriza por los datos nominales que se dan en su ficha técnica.

El régimen nominal del motor es el que corresponde a las condiciones y características indicadas en la ficha técnica.

La potencia nominal P_n del motor es la potencia mecánica que se desarrolla sobre su árbol trabajando a régimen nominal y que se indica en la ficha técnica en vatios o kilovatios.

La velocidad nominal del motor n_{nom} es la velocidad que corresponde al régimen de trabajo nominal del motor y se indica en su ficha técnica.

El par de arranque nominal M_n es un par que desarrolla el motor en el árbol, siendo nominales la potencia y la velocidad de rotación que corresponde al régimen nominal de su funcionamiento.

§ 183. Régimen de trabajo de los motores eléctricos

El plazo de servicio de una máquina depende de las temperaturas máximas a las que ha sido expuesto su aislamiento. Durante la transformación de la energía eléctrica en mecánica, en el motor tiene lugar desprendimiento de calor a cuenta de las pérdidas en el cobre, hierro y por fricción. La temperatura del motor aumenta. Simultáneamente con el calentamiento de las partes del motor, el calor se irradia al medio ambiente. En caso de servicio prolongado, la cantidad del calor que despronde el motor y la que éste irradia al medio ambiente se hacen iguales, la temperatura no se eleva más y se

hace estable. Por eso al determinar la potencia de una máquina, se distinguen tres regímenes de trabajo:

1. El *régimen continuo* se caracteriza por un período de trabajo tan considerable que el calentamiento de la máquina alcanza su estabilidad.

Como ejemplo del régimen continuo se puede citar el trabajo de los motores de ventiladores, compresores, bombas, del motor de instalaciones generadoras, etc. La duración de trabajo de tales motores se calcula por horas y hasta por días.

2. El *régimen de breve duración* se caracteriza porque durante el período de trabajo la temperatura del motor no alcanza su nivel

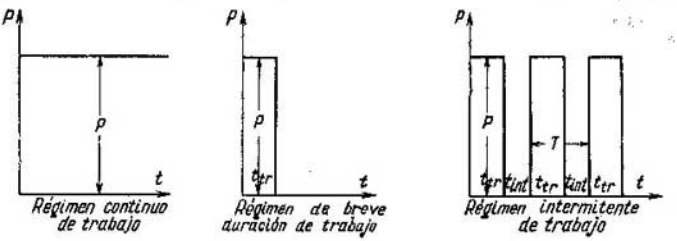


Fig. 383. Gráfica de trabajo de los motores para diferentes regímenes

estable. La pausa después del período de trabajo es tan grande que la temperatura del motor baja hasta la del medio ambiente.

Como ejemplo de trabajo de breve duración puede servir el del motor de puentes levadizos, esclusas, etc.

3. El *régimen intermitente* se caracteriza por la sucesión de períodos de trabajo y de pausas. La duración de un período de trabajo y de una pausa no debe superar 10 min. El régimen intermitente se determina por la duración relativa de un período de trabajo, el cual es la relación entre el tiempo del período de trabajo t_{tr} y la duración total T del período de trabajo y de la pausa. Por ejemplo, si durante una jornada de 8 horas el motor trabajó 5 horas, la duración relativa de un período de trabajo será:

$$\frac{t_{tr}}{T} = \frac{5}{8} \cdot 100\% = 62{,}5\%.$$

La duración relativa del período de trabajo se expresa en tanto por ciento y se designa con IIB (lo que significa duración de conexión). Se consideran normales las magnitudes IIB de 15, 25 y 40%. IIB se indica en la ficha técnica del motor.

Con el régimen de trabajo intermitente funcionan los motores de las grúas, cabrestantes, ascensores, trenes de laminado, algunas máquinas herramienta (mortajadoras, cepilladoras), prensas, etc.

En la fig. 383 se muestran las gráficas de funcionamiento en diferentes regímenes.

§ 184. Aislamiento de las máquinas eléctricas

El calentamiento tolerable de una máquina está limitado por la resistencia al calor de los materiales aislantes, así como por el *sistema de refrigeración del motor.*

Los materiales aislantes que se utilizan en las máquinas eléctricas se dividen en cinco clases.

Clase A. Esta comprende tejidos de algodón, seda, hilaza, papel y otros materiales orgánicos impregnados de distintos aceites, así como esmaltes y barnices.

Clase B. Incluye artículos de mica, amianto y otros materiales inorgánicos que contienen aglutinantes orgánicos.

Clase BC. Consta de mica, fibra de vidrio y amianto con barnices resistentes al calor.

Clase CB. Está compuesta de materiales inorgánicos con barnices resistentes al calor sin emplear materiales aislantes de clase A.

Clase C. Incluye mica, porcelana, vidrio, cuarzo y otros materiales inorgánicos sin aglutinantes.

La temperatura máxima tolerable de calentamiento para los aislantes de la clase A es de 105°C; de la B, 120°C; de la BC, 135°C; de la CB, un poco mayor, según la resistencia al calor de los barnices utilizados; para la clase C, la temperatura no se establece.

Se toma por temperatura media del medio ambiente la de +35°C.

§ 185. Diseños de las máquinas eléctricas

Según el modo de protección contra la acción del medio ambiente se distinguen los siguientes tipos de máquinas eléctricas.

1. *Máquina eléctrica abierta.* Las partes giratorias y los conductores de corriente no están protegidos contra el contacto casual y la penetración de objetos extraños.

2. *Máquina eléctrica semiprotegida.* Las partes giratorias y los conductores de corriente están protegidos contra el contacto casual y la penetración de objetos extraños.

3. *Máquina eléctrica protegida.* Las partes interiores están protegidas contra la penetración de gotas de agua que caen verticalmente.

4. *Máquina eléctrica protegida contra proyecciones laterales de agua.* Las partes interiores de la máquina están protegidas contra la penetración de las salpicaduras de agua que caen de cualquier lado bajo un ángulo de 45° respecto a la vertical.

5. *Máquina eléctrica cerrada.* Las partes interiores de la máquina están aisladas del medio ambiente, pero no tanto como para que se la pueda considerar hermética. Esta máquina se emplea en locales polvorientos y puede ser instalada al aire libre.

6. *Máquina eléctrica protegida contra la penetración de agua.* El interior de la máquina está protegido contra la penetración de agua al bañarla con una manguera. Se emplea en instalaciones navales.

7. *Máquina eléctrica a prueba de explosión.* Es una máquina cerrada, construida de tal modo, que puede resistir una explosión en su interior de los gases que contiene el medio ambiente. Las rendijas, a través de las cuales la cavidad interior se comunica con el medio ambiente, son de tal longitud, que en caso de explosión en el interior de la máquina, la llama no puede salir afuera. Estas máquinas se usan en las minas y algunas empresas químicas.

8. *Máquina eléctrica hermética.* Es una máquina absolutamente cerrada, en la cual todos los orificios están tan bien tapados que a determinada presión exterior se excluye toda comunicación entre la cavidad interior de la máquina y el medio gaseoso o el líquido que la rodea.

§ 186. Refrigeración de las máquinas eléctricas

Según el modo de refrigeración, las máquinas se dividen en los tipos siguientes:

1. *Máquinas de refrigeración natural.* No tiene ventiladores especiales. La circulación del aire refrigerador se realiza por medio de las partes giratorias de la máquina y del fenómeno de convección. Este tipo de ventilación se utiliza a veces en las máquinas abiertas.

2. *Máquinas con ventilación forzada impelente o aspirante*, en las cuales la circulación del gas (generalmente aire) que refrigera las partes calentadas se intensifica por un ventilador especial, a saber:

a) *máquinas autorefrigeradas* que tienen ventilador sobre el árbol (semiprotegidas o cerradas);

b) *máquinas de enfriamiento independiente*, el ventilador lo hace girar un motor independiente (máquinas cerradas).

Las máquinas de potencia baja y media, que funcionan en locales bastante espaciosos con aire limpio para refrigeración, aspiran el aire del local y lo impelen al mismo local.

Las máquinas de tipo cerrado, que funcionan en locales con aire sucio, aspiran por tuberías el aire del exterior y lo expelen al local.

Para evitar un calentamiento excesivo del local, las máquinas cerradas de gran potencia aspiran el aire del exterior y lo expulsan también afuera por tuberías.

Las máquinas con circulación cerrada tienen un volumen constante de aire circulante (o de otro gas, por ejemplo, hidrógeno), el cual, después de pasar a través de la máquina, se dirige al refrigerador de gas.

§ 187. Clasificación de los motores según la característica mecánica (de velocidad)

Dependiendo de las variaciones de la velocidad de rotación del motor, al cambiar la carga en su árbol, los motores se pueden clasificar del modo siguiente:

1. *Motores de velocidad constante de rotación* (características estrictas) en los cuales la velocidad de rotación no depende de la carga (motor sincrónico).

2. *Motor de característica constante*, en el cual al cambiar la carga en el árbol, la velocidad de rotación varía insignificantemente (motores de corriente continua con excitación en derivación, motores asincrónicos de corriente alterna).

3. *Motores de característica decreciente*, cuya velocidad de rotación depende considerablemente de la carga, y el aumento de ésta en el árbol origina una disminución considerable de la velocidad del motor (motor de corriente continua con excitación en serie).

4. *Motores de velocidad escalonada* (motores asincrónicos y sincrónicos con permutación del número de pares de polos).

5. *Motores de velocidad regulable*, en los cuales la velocidad de rotación para la misma carga puede ser variada en ciertos límites (motores de corriente continua con regulación de la corriente de excitación, motores asincrónicos con rotor bobinado, en caso de existir el reóstato regulador en el circuito del rotor).

§ 188. Selección de la potencia de los motores

El funcionamiento de todo mecanismo ejecutor se caracteriza:

1. Por la magnitud de la fuerza de resistencia F que es necesario superar al realizar el proceso tecnológico.

2. Por la velocidad de movimiento v o el número de revoluciones n, o la velocidad angular ω de las partes del mecanismo.

3. Por la potencia útil P_u y consumida P_c. Durante el funcionamiento del mecanismo ejecutor con velocidad constante se vencen solamente resistencias estáticas que se componen de resistencias útiles y nocivas (fricción en los mecanismos, resistencia del medio, etc.). En caso de movimiento variable la impedancia se compone de las resistencias estática y dinámica, provocada por la inercia de masas en movimiento.

En caso de movimiento giratorio las fuerzas de las resistencias se pueden sustituir por los pares:

$$M = M_{est} + M_d,$$

donde M = par total de resistencia;

M_{est} = par estático de resistencia;

M_d = par dinámico de resistencia (inercia de masas).

Los pares se expresan generalmente en kilográmetros (kgm).

El par estático de resistencia M_{est} se compone del par de resistencia útil M_u y del par de fuerzas de fricción M_{fr}:

$$M_{est} = M_u + M_{fr}, \text{ kgm.}$$

Por la física sabemos que durante el movimiento giratorio uniforme, la potencia P_{rot} es igual al producto del par M_{est} por la velo-

cidad angular ω:

$$P_{rot} = M_{est}\omega \text{ kgm/seg},$$

donde

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60},$$

n = número de r.p.m.

Puesto que 2 kW = 1,36 CV ó 1 kW = 1,36 × 75 = 102 kgm/seg, entonces

$$P_{rot} = \frac{M_{est} 2\pi n}{60 \cdot 102} \approx \frac{M_{est} n}{975} \text{ kW}.$$

Al aumentar la velocidad de rotación del mecanismo ejecutor se consume potencia para la aceleración de las partes giratorias. Al contrario, al disminuir la velocidad, la potencia se entregará a las partes giratorias del mecanismo y, en algunos casos, se utiliza, por ejemplo, para quitar los excesos de carga (volantes) o se vuelve a la red (recuperación).

La selección correcta del motor tiene gran importancia. La potencia insuficiente del motor no asegura un funcionamiento normal del mecanismo, lleva a la disminución de la productividad de trabajo y al calentamiento excesivo y peligroso del motor.

La potencia excesiva del motor disminuye el rendimiento de la instalación; en los motores de corriente alterna reduce el factor de potencia; conduce al encarecimiento de la instalación y a grandes pérdidas de energía.

Estudiemos algunos ejemplos para calcular la potencia de un motor que trabaja con diversas cargas. En el cálculo de la potencia no se toma en consideración la inercia de masas giratorias; este cálculo se hace teniendo en cuenta que en el proceso de trabajo la velocidad del mecanismo ejecutor es invariable, no tiene lugar arranques frecuentes y el arranque mismo se hace en vacío.

1. Tornos. La potencia de un motor para tornos se puede calcular por la fórmula:

$$P = \frac{F_c v_c}{60 \cdot 102\eta} \text{ kW},$$

donde F_c = esfuerzo de corte, en kgf,
v_c = velocidad de corte, en m/min,
η = rendimiento de la máquina.

A veces para calcular la potencia del motor se utiliza la expresión de los pares de torsión (dobles, para comodidad del cálculo):

$$2M = F_c d \text{ kgm},$$

donde F_c = esfuerzo de corte, en kgf,
d = diámetro de la pieza que se elabora, en m.

En este caso la potencia del motor se determina por la siguiente fórmula:

$$P = \frac{2M_c n}{2 \cdot 975 \eta} \text{ kW}.$$

Para el accionamiento de los tornos, así como otras máquinas herramienta, se emplean motores asincrónicos de corriente trifásica con mando por botones.

2. Máquinas taladradoras. La potencia de un motor para taladradoras se puede calcular por la fórmula:

$$P = \frac{2M_c n}{2 \cdot 975 \eta} \text{ kW},$$

donde $2M_c$ = par doble de torsión de corte en la broca, en kgm,
n = número de revoluciones de la broca por minuto,
η = rendimiento de la taladradora.

Para el accionamiento de las máquinas taladradoras se utilizan motores asincrónicos de corriente trifásica.

3. Máquinas cepilladoras. Las máquinas cepilladoras se dividen en: cepilladoras (la pieza que se mecaniza está fijada en la mesa y recibe un movimiento de vaivén, la cuchilla permanece inmóvil); limadoras (la mesa con la pieza permanecen fijas, la cuchilla realiza movimiento de vaivén); mortajadoras (no se diferencian de las limadoras, pero la cuchilla se mueve en el plano vertical); especiales (máquinas de dentar).

La potencia del motor y el esfuerzo de corte para las máquinas cepilladoras se determinan igual que para las de tornear.

4. Bombas para líquidos. La potencia de un motor de bombas para fluidos se determina por la fórmula:

$$P = \frac{Q \gamma H}{102 \eta_{bom} \eta_{tr}} \text{ kW},$$

donde Q = caudal de la bomba, en m^3/seg,
γ = peso del líquido, en kgf/m^3,
H = altura de presión total, en m,
η_{bom} = rendimiento de la bomba,
η_{tr} = rendimiento de las transmisiones entre la bomba y el motor.

El caudal de las bombas de émbolo se puede determinar por la fórmula:

$$Q = k\pi \frac{D^2 ln}{4 \cdot 60} \text{ m}^3/\text{seg},$$

donde k = coeficiente de llenado del cilindro por agua (generalmente $k = 0{,}9$),
l = longitud del émbolo, en m,
D = diámetro del émbolo, en m,
n = número de recorridos por minuto en caso de acción simple.

La altura de presión total del agua (calculada) es igual a:

$$H = h_{asp} + h_{imp} + h_p,$$

donde h_{asp} = altura de aspiración,
h_{imp} = altura de impelencia,
h_p = altura que corresponde a las pérdidas de presión (se determina por los datos de las tablas en metros de agua para 100 m lineales de tubería).

5. Compresores. La potencia de un motor del compresor se calcula por la fórmula:

$$P = \frac{AQ}{102\eta_{bom}\eta_{tr}},$$

donde A = magnitud del trabajo necesario para comprimir 1 m³ de aire hasta la presión exigida, en kgm,
Q = rendimiento del compresor, en m³/seg.

Hemos estudiado algunos ejemplos de cómo se calcula la potencia de los motores para diversos mecanismos ejecutores en caso de una carga invariable o poco variable durante largo tiempo.

Por la potencia calculada y el catálogo se halla el motor cuya potencia corresponde a la carga dada.

En la tabla 18 se dan los sistemas principales de los accionamientos eléctricos, su aplicación práctica y gama de regulación de las velocidades de rotación.

Tabla 18

Sistemas principales de accionamientos eléctricos

Sistemas	Carácter y gama de regulación	Aplicación
Motores asincrónicos con rotor de jaula de ardilla:		
con deslizamiento normal	No regulables	Accionamientos de potencia baja y media, que no requieren regulación de la velocidad con pocos arranques
con deslizamiento elevado	No regulables	Lo mismo, con arranques frecuentes, así como accionamiento con volante
con conmutación del número de polos	Regulación escalonada, no mayor de 6 : 1	Accionamientos que toleran regulación eléctrica escalonada de velocidad (por ejemplo, algunas máquinas herramienta empleados en metalurgia de baja potencia y prensas)

Continuación

Sistemas	Carácter y gama de regulación	Aplicación
Motores asincrónicos de rotor bobinado Regulación con reóstato	Relativamente suave, siendo constante el par de carga, no mayor de 2 : 1 Relativamente suave con par de carga del ventilador, 4 : 1 y más	Accionamientos de las grúas, ventiladores metalúrgicos auxiliares, aspiradores de humo
Motores de corriente continua con excitación en derivación, que se alimentan de una red de tensión continua	Suave, no mayor de 4 : 1	Preferentemente para accionamiento eléctrico de máquinas herramienta
Motores con excitación en derivación que se alimentan según el esquema G-M (Generador-Motor)	Suave, 100 : 1 y más	Para mecanismos que requieren gran gama de regulación de velocidad o reversión frecuente (por ejemplo, máquinas herramienta, trenes de laminado de reversión, máquinas de fabricación de papel, etc.)
Motores con excitación en derivación con alimentación de un convertidor iónico	Suave, no más de 60 : 1	Trenes de laminado no reversibles y algunas máquinas herramienta con regulación eléctrica de velocidad
Motores de corriente continua con excitación en serie	Relativamente suave, no mayor de 3 : 1	En las grúas, en las cuales se requiere alta exactitud y pequeña velocidad con características estrictas, se aplican ampliamente para tracción eléctrica
Motores sincrónicos	No regulables	Grandes compresores y bombas, grupos motor-generador, accionamiento principal de los trenes de laminado continuos, no regulables, y accionamientos mediosy grandes de la industria de papel y de cemento

§ 189. Protección de los motores eléctricos

Durante el funcionamiento de los motores eléctricos pueden ocurrir diversas alteraciones del régimen normal. En este caso, para evitar el deterioro del aislamiento del motor, de los devanados y de las conexiones eléctricas, los motores deben tener dispositivos de protección que aseguren la desconexión oportuna de la red.

Las causas más frecuentes de regímenes anormales del motor son sobrecargas, cortocircuitos, disminución o desaparición de la tensión.

Se llama s o b r e c a r g a el aumento de la intensidad de corriente del motor por encima de la magnitud nominal. Las sobrecargas pueden ser pequeñas y de corta duración. Estas no son peligrosas para el motor y no deben ser objeto de atención por parte de la protección. Las sobrecargas pueden ser excesivas y prolongadas y, por eso, peligrosas para los devanados del motor, ya que la gran cantidad de calor que desprende la corriente puede carbonizar el aislamiento y quemar los devanados.

Son peligrosos también para el motor los cortocircuitos que pueden tener lugar en sus devanados. La protección de los motores contra sobrecargas y cortocircuitos se denomina p r o t e c c i ó n m á x i m a d e c o r r i e n t e. La protección máxima se realiza por medio de fusibles, relés de intensidad y relés térmicos. La selección de tal o cual dispositivo protector depende de la potencia, del tipo y del empleo del motor, de las condiciones de arranque y del carácter de las sobrecargas.

§ 190. Protección de los motores eléctricos mediante fusibles

Los f u s i b l e s son dispositivos con un alambre de bajo punto de fusión, hecho de cobre, zinc o plomo y fijado sobre una base aislante. Los fusibles sirven para desconectar al consumidor (parte de la instalación de alumbrado, motor, etc.) de la red en caso de sobrecarga excesiva o cortocircuito, cuando el calor excesivo funde el alambre del fusible, abriendo de este modo el circuito eléctrico. Los fusibles, a pesar de ser los dispositivos de protección más difundidos, tienen muchos defectos.

Los fusibles tienen una potencia límite de desconexión relativamente pequeña. La potencia máxima que pueden desconectar los fusibles u otro instrumento desconectador (por ejemplo, interruptor de aceite, interruptor automático) sin peligro de ser dañado o destruido se llama p o t e n c i a l í m i t e d e d e s c o n e x i ó n.

La fusión del hilo del fusible va acompañada de llama y desprendimiento de gases calientes que pueden provocar quemaduras, ceguera del personal e incendios.

Los fusibles pueden soportar sobrecargas de 25% durante un período ilimitado, de 60% durante una hora, y de 80% cerca de dos minutos.

De este modo, los fusibles no pueden proteger el motor contra sobrecargas pequeñas y prolongadas, éste puede deteriorarse, y el fusible quedará intacto. Sólo en caso de sobrecargas grandes y súbitas o cortocircuitos, los fusibles pueden desconectar rápidamente los motores.

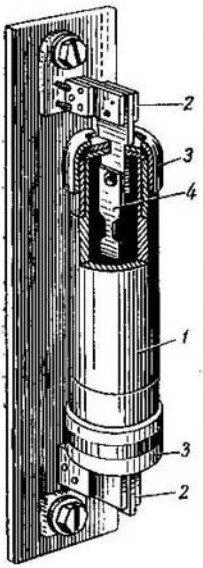


Fig. 384. Fusible de cartucho

Parecería que, eligiendo un fusible para una corriente menor que la nominal del motor, éste se puede proteger contra la sobrecarga. Pero no es así. Es sabido, que la corriente de arranque del motor supera considerablemente la nominal (por ejemplo, la corriente de arranque de un motor asincrónico con rotor de jaula de ardilla supera de 5 a 7 veces su corriente nominal). Los fusibles elegidos para corriente pequeña se fundirían en el momento de arranque del motor.

Para elegir la corriente para el hilo del fusible, en la práctica se utiliza la siguiente expresión:

$$I_f \geqslant \frac{I_{arr}}{2{,}5},$$

donde I_f = corriente del hilo del fusible,

I_{arr} = corriente de arranque del motor.

La expresión citada es aplicable para motores cuya aceleración dura no más de 5 a 10 seg (condiciones normales de arranque). Si el arranque dura de 30 a 40 seg (condiciones difíciles de arranque), la elección de la corriente del fusible parte de la condición de que

$$I_f \geqslant \frac{I_{arr}}{1{,}6 \div 2}.$$

Los fusibles se dividen en los de tapón, de cinta y de cartucho. Los fusibles de tapón se fabrican para tensiones de hasta 500 V y para corrientes de 2 a 60 A y se emplean para proteger las redes de alumbrado y los motores de baja potencia.

Actualmente se trata de evitar el uso de los fusibles de cinta debido a que presentan grandes defectos (desprendimiento del metal fundido, dificultad de su sustitución).

Los fusibles de cartucho de baja tensión se fabrican para tensiones de hasta 500 V y para corrientes de 6 a 1.000 A. Según su construcción, los fusibles de cartucho pueden ser con tubo abierto de porcelana (tipo СПО) o con tubo cerrado de cristal, de fibra vulcanizada o de porcelana. Los tubos, a través de los cuales pasa el elemento fusible, se rellenan a menudo con arena de cuarzo (tipo ПН, fusible rellenado).

En el momento de fundirse el fusible, la arena divide el arco eléctrico en varios arcos pequeños, los enfría y se apagan rápidamente.

En la práctica han adquirido la mayor aplicación los fusibles de cartucho gasógenos ПР (fig. 384), que constan de tubo de fibra vulcanizada *1* cerrado por ambos extremos con caperuzas de latón *3*. En el interior del tubo se coloca el hilo fusible de aleación de zinc *4*. El fusible se inserta en los contactos *2*.

El funcionamiento del fusible ПР consiste en lo siguiente: en el momento de fundirse el elemento fusible, una parte de la superficie interior del tubo de fibra vulcanizada se descompone bajo la acción de la temperatura elevada del arco, el gas que se desprende con gran contenido de hidrógeno desioniza el arco eléctrico, el cual se extingue rápidamente.

Los fusibles ПР ofrecen gran capacidad de desconexión y su empleo no es peligroso.

Por capacidad de desconexión de un instrumento se sobreentiende la potencia límite de desconexión que puede desconectar el instrumento dado.

§ 191. Protección de los motores eléctricos mediante interruptores automáticos

En los circuitos eléctricos de corriente continua y alterna de tensión de hasta 500 V se emplean interruptores automáticos de aire o simplemente automáticos.

La misión de los interruptores automáticos consiste en desconectar los circuitos eléctricos en caso de sobrecargas o cortocircuitos.

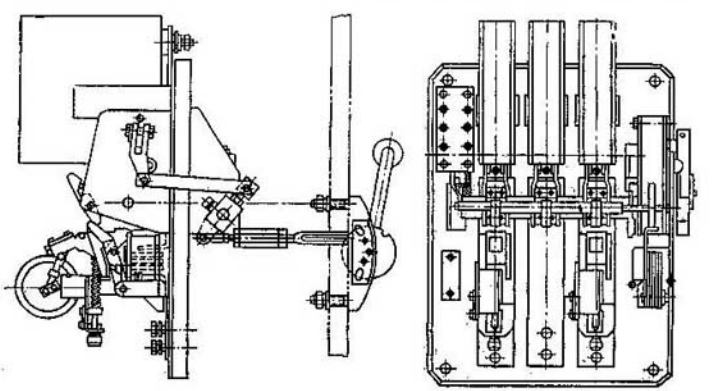


Fig 385. Aspecto general de un interruptor automático de aire

En los circuitos de corriente alterna se usan interruptores automáticos de serie A-2.000, en los de corriente continua, los de serie AB-45-1. Los tipos de interruptores automáticos se diferencian por la corriente nominal.

Estos pueden ser unipolares, bipolares y tripolares con mando manual y a distancia. El aspecto general del interruptor automático A-2.050 se muestra en la fig. 385.

§ 192. Protección de los motores eléctricos mediante relés térmicos

El principio de funcionamiento de un relé térmico con lámina bimetálica fue estudiado en el § 53. En la fig. 386 se muestra esquemáticamente la estructura de un relé térmico que se incorpora a los arrancadores magnéticos (véase § 198).

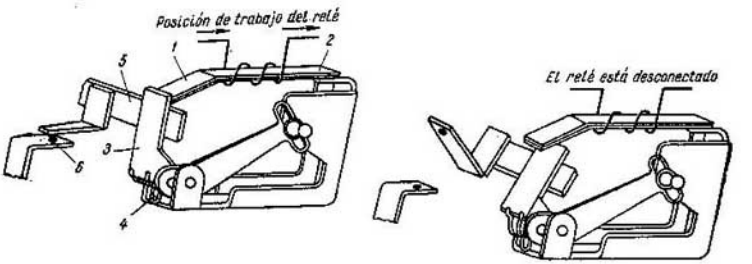


Fig. 386. Esquema de un relé térmico

La pieza principal del relé es la lámina bimetálica *1*. Bajo la acción del calor del elemento calentador *2*, la lámina bimetálica se deforma y se comba, dejando libre el trinquete *3*. Movido por el muelle *4*, el trinquete gira alrededor de su eje y, mediante el tirante *5*, desconecta los contactos *6* normalmente cerrados del circuito auxiliar del relé. La recuperación del trinquete a su posición inicial se efectúa por medio del botón de recuperación.

Existen relés térmicos donde la lámina bimetálica se calienta por la corriente de trabajo del motor.

Los relés térmicos con láminas bimetálicas se fabrican para corrientes de 0,5 a 600 A.

El elemento calentador del relé térmico se elige según la corriente nominal del motor.

Los relés térmicos protegen los motores contra las sobrecargas, pero no pueden desconectar el motor en caso de cortocircuito. Esto se explica, porque cuando surgen cortocircuitos es necesario desconectar el motor instantáneamente mientras que para calentar la lámina bimetálica se requiere cierto tiempo.

La temperatura ambiente ejerce gran influencia sobre el funcionamiento del relé térmico. Por eso, para su buen funcionamiento, éste debe encontrarse en las mismas condiciones de temperatura que el motor que protege, es decir, el relé debe ser instalado junto al motor, en el mismo local.

§ 193. Aparatos de mando de los motores eléctricos

El mando de los motores de tensión de hasta 500 V se puede realizar a mano, de modo semiautomático y automático.

El mando a mano consiste en el cierre del circuito del motor mediante un interruptor de cuchilla o de un conmutador.

En caso de mando semiautomático, la conexión del motor se realiza por medio de instrumentos cuyos circuitos de conexión se cierran al apretar el botón.

El mando automático del mecanismo se efectúa tanto por el mismo mecanismo ejecutor como mediante un dispositivo especial, que en el momento necesario conecta o desconecta el motor.

Para el mando de los motores se emplean distintos instrumentos de mando.

§ 194. Interruptores de cuchilla, conmutadores e interruptores de paquete

Para el mando a mano de los motores en circuitos de corriente continua y alterna de tensión de hasta 500 V, como se ha indicado ya, se utilizan interruptores de cuchilla y conmutadores. Según el número de cuchillas, éstos se dividen en unipolares, bipolares y tripolares.

El mando de los interruptores de cuchilla y de los conmutadores se puede realizar mediante un mango o un accionamiento de palanca. En el primer caso, los interruptores de cuchilla se instalan en la parte frontal del cuadro, en el segundo, en la parte posterior de éste y su mando se efectúa mediante una palanca del accionamiento instalada en la parte delantera del cuadro.

El interruptor bipolar y tripolar sin cuchillas de apertura y con mango se compone de dos o tres cuchillas ligadas entre sí mediante un travesaño aislante y un mango. Cada cuchilla gira a charnela en el muelle inferior de contacto. Al conectar las cuchillas, éstas entran con su parte superior en el muelle de contacto superior, y, al desconectar, por medio de un despositivo especial se mantienen en posición horizontal.

El conmutador con cuchillas de apertura tiene, además de las principales, cuchillas adicionales, ligadas con las primeras mediante muelles. En el momento de desconectar, de los muelles superiores de contacto, primero, salen las cuchillas principales, después, bajo la acción de muelles, se desconectan rápidamente las de apertura.

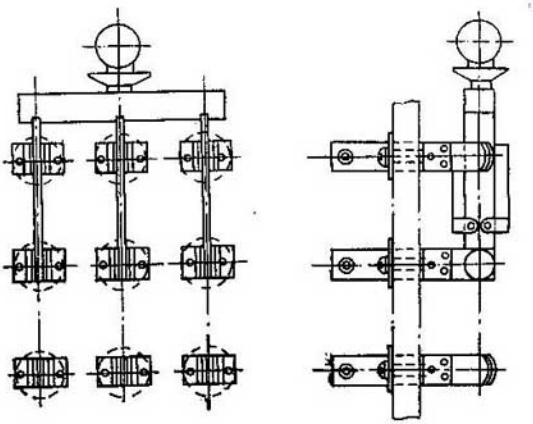


Fig. 387. Conmutador con cuchillas de apertura

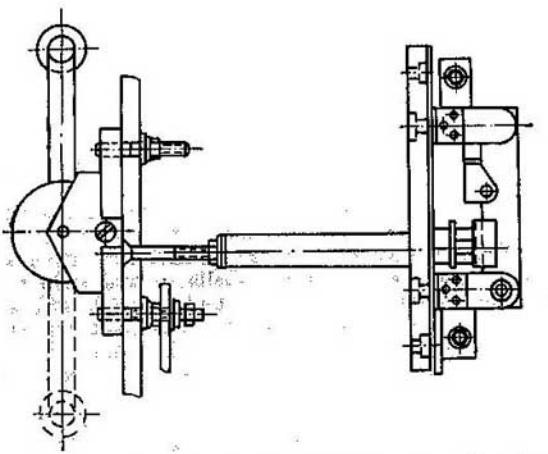


Fig. 388. Interruptor de cuchilla con accionamiento de palanca

El arco eléctrico que aparece en el lugar de apertura se extingue rápidamente y las cuchillas se queman menos.

De acuerdo con las normas de la técnica de seguridad, los interruptores de cuchilla para tensiones de 380 y 500 V deben tener una envoltura protectora o un accionamiento de palanca.

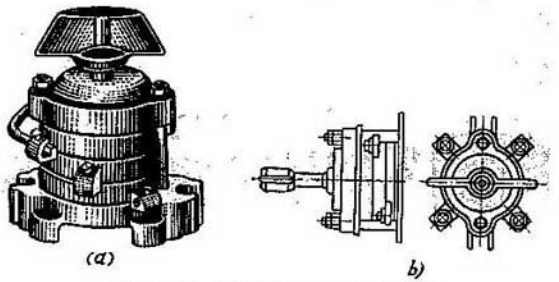


Fig. 389. Interruptor de paquete:
a — vista general, *b* — diseño

Los interruptores con mango se fabrican de los tipos siguientes: PO-3 (de 100 a 400 A), PO-5 (de 600 a 1.000 A), PO-7 (de 1.500 A). Los conmutadores con mango se fabrican de los tipos siguientes: ПО-3 (de 100 a 400 A) y ПО-5 (de 100 a 600 A). Los interruptores y conmutadores con accionamiento de palanca se fabrican de tipo РПО-3, РПО-5, ППО-3 y ППО-5 para corrientes de 100 a 1.000 A.

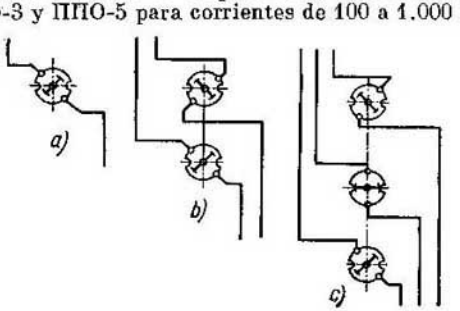


Fig. 390. Esquema de conexión de los interruptores de paquete

En la fig. 387 se muestra un conmutador con cuchillas de apertura y en la fig. 388, un interruptor de cuchilla con accionamiento de palanca.

Para conectar y desconectar a mano los circuitos eléctricos de corriente continua de tensión de hasta 250 V y de corriente alterna

de hasta 380 V se emplean interrures ddote paquete ПК (fig. 389). El interruptor consta de varios paquetes circulares, hechos de un material aislante (carbolita). En el interior del paquete gira un contacto móvil que realiza la apertura y el cierre del circuito. Varios paquetes se montan juntos y se sujetan con espárragos.

Los interruptores de paquete se fabrican unipolares, bipolares y tripolares, para corrientes de 6 a 100 A.

Los esquemas de conexión de los interruptores de paquete unipolares, bipolares y tripolares se dan en la fig. 390,*a*, *b* y *c*.

§ 195. Contactores

Para el mando a distancia y automático de los motores eléctricos se usan contactores. Según sea la corriente, los contactores pueden ser de corriente continua y de corriente alterna.

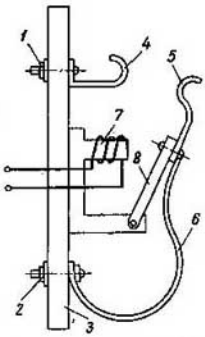


Fig. 391. Esquema de un contactor de corriente continua

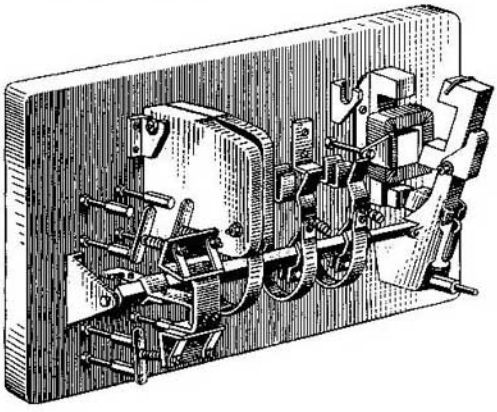


Fig. 392. Contactor de corriente alterna

El esquema de un contactor de corriente continua se muestra en la fig. 391. El circuito de fuerza ue se cierra por el contactor, pasa por los contactos *1 2* fijados en la base aslante *3*, por los contactos del mismo contactor *4* y *5* y la unión flexible conductora de corriente *6*. El cierre del contactor se realiza mediante el electroimán *7*, cuyo devanado se alimenta del circuito auxiliar de mando.se Al cerrar el circuitto de mando, el electroimán atrae el inducido *8* y éste cierra los contactos del contactor.

El contbctor se mantiene en posición conectada mientras esté cerrado el circuito del devanado del olectroimán. Los contactores

de corriente continua КП se fabrican con uno, dos y tres contactos principales que funcionan en circuitos de corriente continua de 220, 440 y 600 V de tensión. Las corrientes nominales, para las cuales están calculados los contactos principales, son de 20 a 250 A. Las bobinas de los electroimanes de los contactores КП están calculadas para tensiones de 48, 110 y 220 V.

Además de los contactos principales que sirven para cerrar y abrir los circuitos de fuerza, los contactores están dotados de bloque-contactos para circuitos de señalamiento y otros fines.

Los contactores КП admiten de 240 a 1.200 conexiones por hora.

El esquema de un contactor de corriente alterna КТ se muestra en la fig. 392. Las bobinas de conexión de los contactores КТ se fabrican para tensiones de 127, 220, 380 y 500 V y para frecuencia de 50 Hz. Los contactores КТ toleran hasta 120 conexiones por hora.

§ 196. Combinadores o controllers

Para el arranque de motores, cambio de dirección de rotación, regulación de la velocidad y parada de motores se emplean instrumentos denominados c o m b i n a d o r e s o c o n t r o l l e r s. Según sea el género de corriente, los combinadores pueden ser de corriente continua y alterna. Los combinadores, cuyos contactos se conectan a los circuitos de fuerza de los motores, se denominan c o m b i n a d o r e s d e f u e r z a.

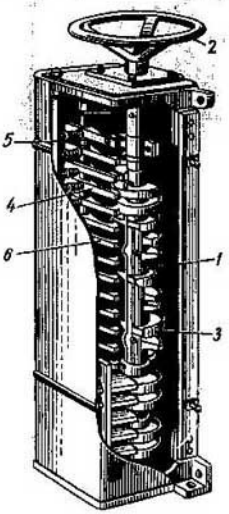


Fig. 393. Combinador de tambor:
1 — árbol, *2* — volante, *3* — lámina de cobre, *4* — contactos fijos, *5* — varilla aislante, *6* — dados de cobre

Existen combinadores que cierran los circuitos de mando de instrumentos electromagnéticos (por ejemplo, de contactores) y éstos, a su vez, cierran y abren los circuitos de fuerza de los electromotores. Tales combinadores se denominan c o m b i n a d o r e s d e g o b i e r n o (mando).

De acuerdo a la construcción del sistema de contactos, los combinadores pueden ser d e t a m b o r y d e l e v a.

En la fig. 393 se muestra un combinador de tambor. El árbol del combinador *1* se hace girar por medio del volante *2* (o manivela). En el árbol hay fijadas láminas aisladas de cobre *3* que tienen forma de segmentos y que son contactos móviles. Los segmentos pueden ser de distinta longitud y desplazados uno respecto a otro en cierto ángulo. Algunos segmentos están unidos eléctricamente entre sí.

Al girar el árbol del combinador, sus segmentos tocan los contactos fijos *4*, sujetos a una placa aislante *5*. Los contactos fijos de tipo de bulón (bulones) terminan en «dados» *6* fácilmente sustituibles. Como resultado de la unión de los contactos móviles con los fijos se operan las conmutaciones necesarias en el circuito que se gobierna.

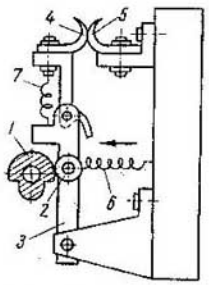


Fig. 394. Esquema de un combinador de leva: *1* — arandela de leva, *2* — rodillo, *3* — palanca, *4*, *5* — contactos, *6* — muelle accionador, *7* — muelle de presión

Para eliminar el paso del arco eléctrico de un bulón a otro, éstos se separan por tabiques de fibrocemento. Para apagar el arco, los combinadores se dotan de una bobina apagadora. Su funcionamiento está basado en la acción recíproca entre el conductor con corriente y el campo magnético. En el momento de formarse el arco, éste se encuentra en el campo magnético de la bobina. Se crea una fuerza que hace desviar el arco, debido a lo cual éste se alarga, se enfría intensamente y se extingue.

El combinador de leva consta de un juego de elementos contactores que se cierran y se abren por medio de arandelas de leva dispuestas en el árbol del combinador.

El esquema del sistema de contactos de un combinador de leva se muestra en la fig. 394.

Cuando el árbol del combinador gira, la arandela de leva *1*, asentada sobre el árbol, se desplaza cierto ángulo y oprime el rodillo *2* fijado a charnela sobre la palanca *3*. El desplazamiento de la palanca (en la fig. 394, a la derecha) conduce al cierre de los contactos *4* y *5*. En el momento de la unión de los contactos, el contacto móvil comienza a deslizarse sobre el fijo. Tiene lugar el así llamado pulido de los contactos, que quita el óxido de las superficies de contacto. El muelle accionador *6* aprieta el rodillo contra la superficie de la arandela de leva. La presión recíproca de los contactos se asegura con el muelle *7*.

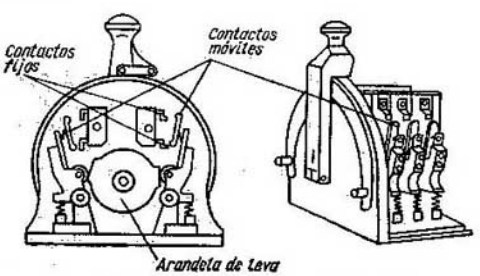


Fig. 395. Combinador de mando

Para extinguir mejor el arco, cada elemento de contacto del combinador está dotado de un dispositivo individual para apagarlo.

Los contactos de combinadores de leva disponen de mayor potencia de apertura que los de combinadores de tambor y toleran mayor número de conexiones (hasta 600 conexiones por hora).

En la fig. 395 está representado un combinador de mando, serie KA-5.000. El principio de funcionamiento de un combinador de mando es análogo al de un combinador le leva. Los combinadores de mando tienen de 2 a 14 circuitos principales y de 1 a 7 posiciones de trabajo.

§ 197. Botones de mando

Para el mando a distancia de los instrumentos electromagnéticos y los circuitos de señalamiento se emplean botones de mando KV-121.

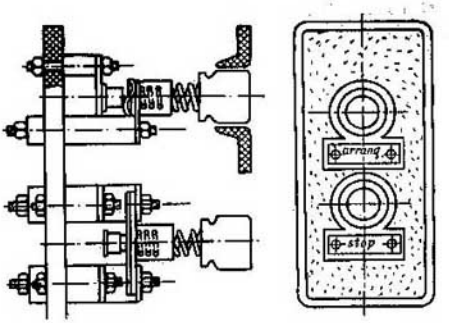


Fig. 396. Botones de mando

Los cuadros de botones se montan de 1, 2 y 3 elementos. Cada elemento tiene un contacto normalmente abierto y un contacto normalmente cerrado. Se denomina convencionalmente p o s i c i ó n n o r m a l d e c o n t a c t o s cuando sobre los botones no se ejerce ninguna acción exterior.

La tensión nominal, para la cual está calculada la aplicación de los botones de mando, no debe superar 440 V para la corriente continua y 500 V para la alterna. En la fig. 396 está reproducido un cuadro de botones de dos elementos.

§ 198. Arrancadores magnéticos

Los arrancadores magnéticos son aparatos electromagnéticos que se emplean para el mando a distancia de motores asincrónicos trifásicos. Los arrancadores magnéticos tienen dos circuitos: el principal, o de fuerza, y el auxiliar, o de mando.

El circuito de fuerza se compone de fusibles, contactos de la línea y elementos calentadores de los relés térmicos.

Por el circuito de fuerza, la energía eléctrica de corriente trifásica va al devanado del estator del motor gobernado.

El circuito de mando del arrancador se compone de un cuadro de dos botones: «arranque» y «stop», que conecta la bobina del arrancador, el bloque-contacto y los contactos de los relés térmicos. El circuito de mando sirve para gobernar el arrancador propiamente dicho.

En la fig. 397 se da el esquema de un arrancador magnético no reversible (tipo ПМ) que se gobierna desde el cuadro de botones de mando.

El arrancador funciona del modo siguiente: al apretar el botón «arranque», la corriente pasa de la primera fase por el botón «arranque», por el puente, por el botón «stop», la bobina conectadora *B cont*, por los contactos de los relés térmicos R_{term} y viene a la tercera fase. La bobina atrae al inducido, los contactos de la línea principales C_{pr} se cierran, el motor recibe tensión y comienza a girar. Al conectarse los contactos principales C_{pr}, se cierran simultáneamente los bloques-contacto *BC* que shuntean el botón «arranque», pudiendo soltarlo entonces.

La corriente que alimenta la bobina conectadora pasa de la primera fase a través de los bloques-contacto *BC*, el botón «stop», etc. El motor se para apretando el botón «stop», ya que entonces los contactos de la línea se abren. La protección del motor contra sobrecargas se realiza mediante relés térmicos, cuyos elementos calentadores se eligen de acuerdo con la corriente nominal del motor. Al pasar una corriente que supera la nominal por el devanado del motor, los relés térmicos abren sus contactos, lo que produce la apertura del circuito que conecta las bobinas, los contactos de la línea se abren y el motor se para automáticamente.

Para hacer regresar los contactos de los relés térmicos a su posición inicial se oprime el botón «reposición».

Después de desconectarse el arrancador bajo la acción del relé térmico, hasta su conexión siguiente han de pasar de 0,5 a 3 min. Este tiempo es suficiente para que se enfríe la lámina bimetálica del relé térmico y parcialmente el devanado del motor.

La bobina del arrancador está calculada para el funcionamiento a una tensión 85—100% de la nominal. La tensión mínima, a la cual la bobina mantiene con seguridad el arrancador en posición conectada, es de 50 a 60% inferior a la nominal. En caso de caída brusca o desaparición completa de la tensión de la red, la bobina del arrancador desconecta automáticamente los contactos principales, realizando de este modo la desconexión del motor.

Los fusibles que se instalan independientemente ante el arrancador protegen la red contra cortocircuitos en el motor.

Para los motores reversibles (que cambian el sentido de rotación) se instalan arrancadores magnéticos reversibles (tipo ПМР).

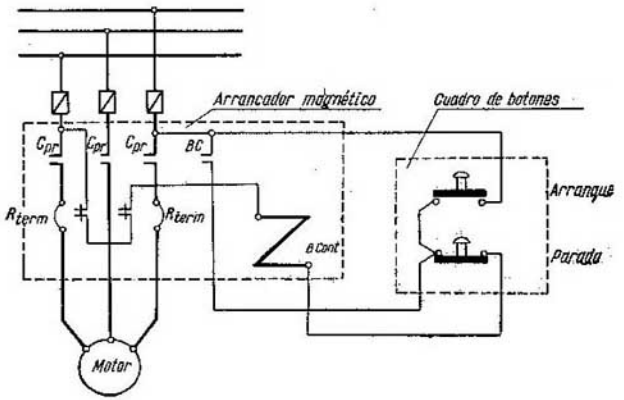


Fig. 397. Esquema de un arrancador magnético no reversible:
C_{pr} — contactos de fase principales, R_{term} — relés térmicos, BC — bloques-contacto
B Cont — bobina del electroimán de conexión

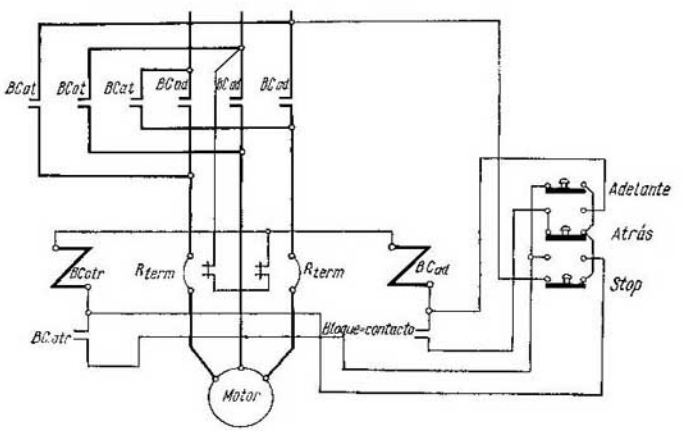


Fig. 398. Esquema de un arrancador magnético reversible

El esquema de este arrancador se da en la fig. 398.

En el arrancador magnético reversible hay dos contactores: uno, para hacer marchar el motor «adelante», y otro, para la marcha atrás, «atrás». El arrancador tiene dos bobinas: BC_{ad}, bobina de conexión «adelante» y BC_{at}, bobina de conexión «atrás».

El cuadro dispone de tres botones, «adelante», «atras» y «stop».

Ambos contactores del arrancador tienen bloqueo mecánico y eléctrico para que, al conectar uno, no pueda ser conectado el otro. El bloqueo se realiza mediante los contactos del cuadro de botones que están normalmente cerrados por los botones «adelante» y «atrás». El papel de los relés térmicos R_{term}, los contactos de los mismos y de los bloques-contacto es el mismo que en los arrancadores no reversibles.

Examinemos el funcionamiento de un arrancador magnético reversible. Al apretar, por ejemplo, el botón «adelante», la corriente de una fase pasa por el botón «stop», después por el botón «atrás» que conecta la bobina «adelante» BC_{ad}, luego a través de los contactos de los relés térmicos R_{term} a otra fase. La bobina conectadora BC_{ad} se excita y cierra los contactos de la línea «adelante». Al mismo tiempo se conecta el bloque-contacto BC y shuntea el botón «adelante» que ahora se puede soltar. El motor recibe tensión y comienza a girar. Conviene prestar atención a que, cuando apretamos el botón «adelante», la corriente pase a través del botón «atrás» y al revés. De este modo se realiza el bloqueo eléctrico. El cambio de la dirección de rotación (reversión) ocurre al cerrar el contactor «atrás» que cambia de lugares dos fases extremas.

§ 199. Arranque de los motores asincrónicos

El arranque de motores asincrónicos se puede realizar a tensión normal (arranque directo) o a tensión reducida.

El arranque directo se realiza por medio de interruptores de cuchilla, conmutadores, interruptores de paquete, arrancadores magnéticos, contactores y combinadores. En caso de arranque directo, se le suministra al motor la tensión de la red. El defecto de este método consiste en las grandes corrientes de arranque, que superan de 2 a 7 veces las corrientes nominales de los motores.

El arranque más sencillo de los motores asincrónicos de rotor de jaula de ardilla es el directo. El arranque y el paro de dichos motores se efectúa conectando o desconectando el interruptor de cuchilla (arrancador magnético), etc. En la fig. 399 se muestra el esquema de arranque de un motor asincrónico de jaula de ardilla. El arranque de motores asincrónicos de rotor bobinado se realiza mediante un reóstato de arranque intercalado al devanado del rotor a través de anillos y escobillas. Antes de arrancar el motor hace falta convencerse de que la resistencia del reóstato de arranque está completamente adicionada. Al terminar el arranque, el reóstato se

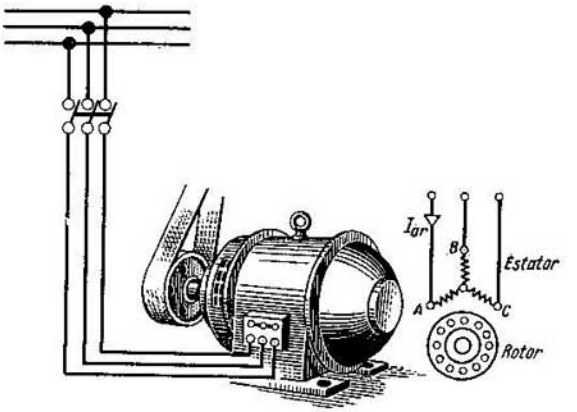


Fig. 399. Arranque directo de un motor asincrónico de rotor de jaula de ardilla

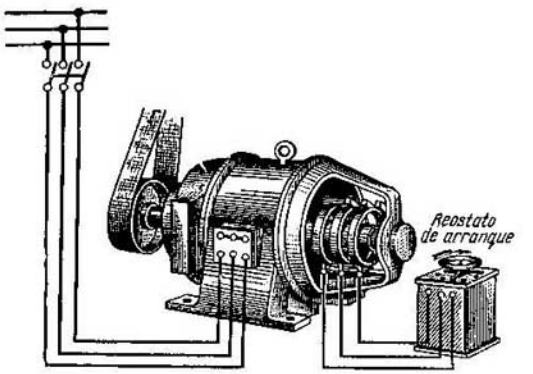


Fig. 400. Esquema de arranque de un motor asincrónico de rotor bobinado

desconecta gradualmente y se pone en cortocircuito. La presencia de una resistencia activa en el circuito del rotor durante el arranque conduce a la disminución de la corriente de arranque y al aumento del par de arranque. En la fig. 400 se da el esquema de arranque de un motor asincrónico de rotor bobinado.

Para disminuir las corrientes de arranque de los motores asincrónicos se reduce la tensión que se proporciona a los devanados del estator del motor.

Estudiemos dos procedimientos para arrancar los motores asincrónicos mediante tensión reducida: con el conmutador estrella-triángulo y con un autotransformador.

Arranque por medio del conmutador estrella-triángulo. En la fig. 401 se muestra el esquema de conexión del devanado del estator con el conmutador estrella-triángulo. En el momento de arranque, el devanado del estator se conecta en estrella mediante un interruptor de cuchilla y, tan pronto como el motor desarrolle la velocidad de rotación máxima posible para esta conexión, el interruptor de cuchilla se aparta a la izquierda, el devanado del estator resulta conectado en triángulo y el motor obtiene la posibilidad de desarrollar la máxima velocidad. Con este método de arrancar el motor,

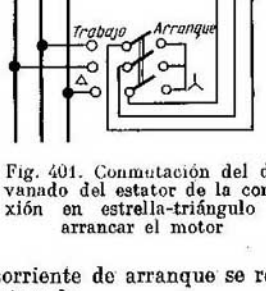


Fig. 401. Conmutación del devanado del estator de la conexión en estrella-triángulo al arrancar el motor

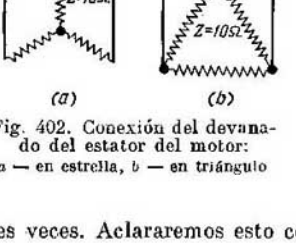


Fig. 402. Conexión del devanado del estator del motor: *a* — en estrella, *b* — en triángulo

la corriente de arranque se reduce tres veces. Aclararemos esto con un ejemplo.

En la fig. 402,*a* está reproducido esquemáticamente un devanado del estator conectado en estrella durante el arranque. Supongamos que la tensión entre los conductores de la línea del motor sea igual a 380 V, y, por consiguiente, la tensión que corresponde a cada fase del motor durante el arranque será igual a:

$$U_{fY} = \frac{U_{compY}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1{,}73} = 220 \text{ V}.$$

Puesto que la resistencia aparente del devanado de fase del motor es igual a 10 ohmios, la corriente de una fase será:

$$I_{fY} = \frac{U_{fY}}{z} = \frac{220}{10} = 22 \text{ A}.$$

En caso de conexión en estrella $I_{lY} = I_{fY}$. Por eso, la corriente que consume el motor al final del arranque (sin tener en cuenta las corrientes de arranque) será también igual a 22 A.

En la fig. 402,*b* está representado esquemáticamente el mismo motor, cuando su devanado está conectado en triángulo y unido a la

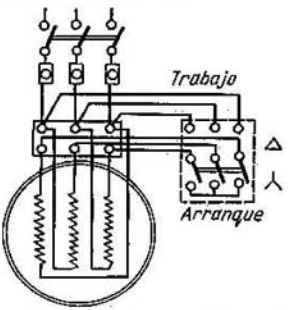


Fig. 403. Esquema de conexión al circuito del estator de un motor asincrónico de un conmutador de estrella a triángulo

tensión compuesta de 380 V. En este caso $U_{comp\,\Delta} = U_{f\Delta}$, y la corriente de una fase del motor será:

$$I_{f\Delta} = \frac{U_{f\Delta}}{z} = \frac{380}{10} = 38 \text{ A}.$$

Puesto que para la conexión en triángulo

$$I_{l\Delta} = I_{f\Delta}\sqrt{3},$$

en este caso el motor consumirá de la red la corriente de la línea:

$$I_{l\Delta} = 38 \cdot \sqrt{3} = 66 \text{ A}.$$

Como se ve por el ejemplo citado, la corriente de la línea del motor, en caso de conexión en estrella, es tres veces menor que la corriente de la línea del motor, en el cual el devanado del estator está en triángulo.

En la fig. 403 se muestra el esquema de conexión del conmutador estrella-triángulo en el circuito del estator de un motor asincrónico.

El tipo de arranque del motor estudiado, reduce la corriente de puesta en marcha tres veces y, como de acuerdo con lo demostrado, el par de arranque es proporcional a la corriente del rotor, y, por lo tanto, aproximadamente también a la del estator, el par de arranque del motor disminuye simultáneamente también tres veces. Por eso,

los motores con este tipo de arranque pueden ser empleados únicamente en los casos cuando se ponen en marcha en vacío o con carga pequeña.

Se sobreentiende, que la conmutación del devanado del estator de estrella a triángulo durante el arranque se puede realizar solamente en los motores que funcionan normalmente por el esquema de triángulo.

Arranque por medio de un autotransformador. La tensión que se proporciona al motor se puede disminuir disminuyendo de este modo la corriente de arranque del mismo por medio de un autotransformador. En la fig. 404,*a* se muestra el esquema de puesta en marcha

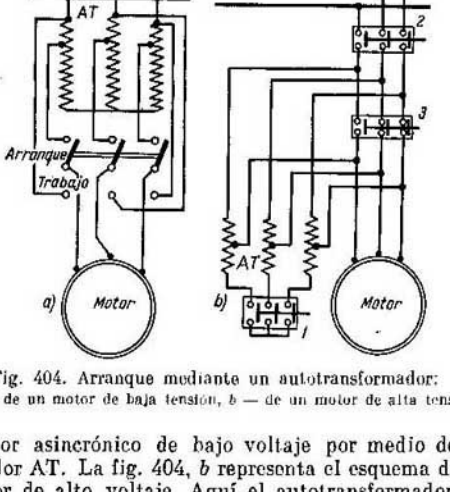


Fig. 404. Arranque mediante un autotransformador:
a — de un motor de baja tensión, *b* — de un motor de alta tensión

de un motor asincrónico de bajo voltaje por medio de un autotransformador AT. La fig. 404, *b* representa el esquema de arranque de un motor de alto voltaje. Aquí el autotransformador AT tiene un punto neutro desconectable. Para el arranque del motor se utiliza el interruptor de aceite *1*, conectando el cual se cierra el punto neutro del autotransformador. Después se conecta el interruptor de aceite principal *2*; al motor se le proporciona de la red, a través del autotransformador, una tensión reducida y el motor se pone en marcha. Al alcanzar éste la velocidad máxima posible (para la conexión dada), se desconecta el interruptor de aceite *1* y se conecta el interruptor de aceite *3*, con lo cual el motor recibe la tensión completa de la red y desarrolla la velocidad normal de rotación.

Durante el arranque, los autotransformadores reducen la tensión a 50—80%.

§ 200. Arranque de los motores sincrónicos

Uno de los defectos principales de los motores sincrónicos consiste en lo difícil de su arranque. La puesta en marcha de los motores sincrónicos puede ser realizada por medio de un motor auxiliar de arranque o de un arranque asincrónico.

El arranque del motor sincrónico con un motor auxiliar. Si ponemos en rotación el rotor de un motor sincrónico, con polos excitados por otro motor auxiliar, hasta la velocidad de rotación del campo del estator, los polos magnéticos del estator, interactuando con los del rotor, lo harán girar a éste independientemente al compás del campo del estator, es decir, de modo sincrónico.

En la fig. 405 se muestra el esquema de arranque de un motor sincrónico *1* por medio de un motor asincrónico auxiliar *2*.

Para realizar el arranque es necesario que el número de pares de polos del motor asincrónico sea menor que el del motor sincrónico, ya que en estas condiciones el motor asincrónico auxiliar puede impartir al rotor del motor sincrónico la velocidad de sincronismo.

El orden de puesta en marcha de un motor sincrónico es el siguiente. Al conectar el interruptor de cuchilla *3* se pone en marcha el motor asincrónico auxiliar *2*, el cual hace girar el rotor del motor sincrónico *1* hasta desarrollar la velocidad que corresponde a la del campo del estator. La velocidad de rotación del motor auxiliar se determina con un tacómetro *. Después, conectando el interruptor de cuchilla *4* de corriente continua, se excitan los polos del rotor. Para conectar el motor sincrónico a la red de corriente trifásica hace falta sincronizarlo igual que al conectar un generador sincrónico para trabajo en paralelo. Para eso, mediante el reóstato *5* se establece tal excitación, que la tensión del devanado del estator según el voltímetro V sea igual a la tensión de la red que indica el voltímetro V_1. Las lámparas eléctricas *6*, conectadas en paralelo a las cuchillas del interruptor *7* de la red trifásica, centellearán al estar el interruptor desconectado. Al principio, el centelleo será a muy pequeños intervalos, pero si cambiamos la velocidad de rotación del motor asincrónico auxiliar, los intervalos crecerán. El motor sincrónico se puede conectar a la red de corriente trifásica mediante el interruptor *7*, cuando las tres lámparas se apaguen simultáneamente. El rotor del motor entra en sincronismo y puede girar en adelante independientemente. Ahora, con el interruptor *3* se puede desconectar de la red el motor auxiliar *2*.

Lo complicado del arranque y la necesidad de un motor auxiliar son inconvenientes sustanciales de esta manera de arrancar los motores sincrónicos. Por eso, actualmente, se utiliza raras veces.

---

* El tacómetro es un instrumento que mide la velocidad de rotación de las máquinas.

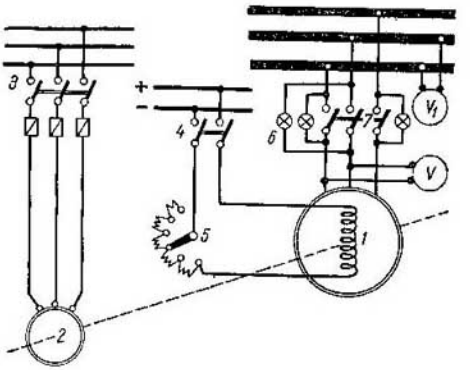


Fig. 405. Esquema de arranque de un motor sincrónico por medio de un motor de arranque

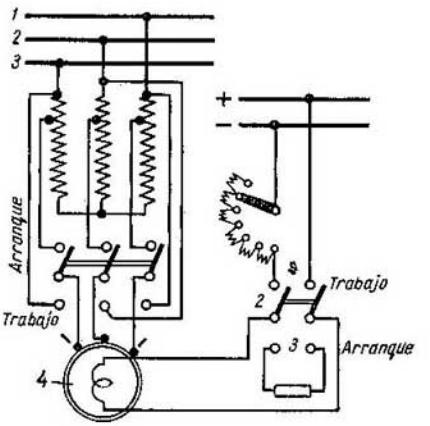


Fig. 406. Esquema de arranque asincrónico de un motor sincrónico mediante un autotransformador

Arranque asincrónico de un motor sincrónico. Para realizar el arranque de esta manera, en los terminales de los polos del rotor se coloca un devanado adicional en cortocircuito. Puesto que durante el arranque en el devanado inductor *1* del motor se induce una f.e.m. grande, éste, por consideraciones de seguridad, se cierra con el interruptor de cuchilla *2* a la resistencia *3* (fig. 406).

Al conectar la tensión trifásica de la red al devanado del estator *4* del motor sincrónico, surge un campo magnético giratorio que, atravesando el devanado cortocircuitado (de arranque) alojado en los terminales polares del rotor, induce en éste corrientes.

Dichas corrientes, interactuando con el campo giratorio del estator, harán girar el rotor. Al alcanzar el rotor el número máximo de revoluciones (de 95 a 97% de la velocidad sincrónica), el interruptor *2* se conmuta de modo que el devanado del rotor sea conectado a la red de corriente continua.

El defecto del arranque asincrónico consiste en la gran corriente de arranque (de 5 a 7 veces mayor que la corriente de servicio). La corriente de arranque origina una caída de tensión en la red y esto se refleja en el trabajo de otros consumidores. Para reducir la corriente de arranque, se aplica la puesta en marcha con tensión reducida, por medio de un reactor * o de un autotransformador.

Actualmente se utiliza casi exclusivamente el arranque asincrónico de motores sincrónicos, debido a su sencillez y seguridad. Existen también esquemas de arranque asincrónico automático de los motores sincrónicos.

§ 201. Cambio de la dirección de rotación de los motores eléctricos (reversión)

El cambio de la dirección de rotación de motores de corriente continua se realiza mediante el cambio del sentido de la corriente en el devanado del inducido, quedando invariable la dirección de la corriente en el devanado inductor, o cambiando la dirección de la corriente en el devanado inductor, quedando invariable la dirección de la corriente en el devanado del inducido. Pero, si se cambia simultáneamente la dirección de la corriente en el devanado del inducido y en el inductor, la dirección de rotación del motor no cambiará.

La reversión de los motores de corriente continua con excitación en serie se puede realizar, bien cambiando la dirección en el devanado del inducido, bien en el inductor.

La reversión de los motores con excitación en derivación y compuesta se efectúa cambiando la dirección de corriente en el devanado del inducido. La apertura de los circuitos de los devanados inducto-

---

* Reactor es una reactancia inductiva hecha en forma de bobina sin núcleo de acero.

res en derivación, para cambiar en éstos la dirección de corriente, puede conducir al deterioro de su aislamiento debido al surgimiento de gran f.e.m. de autoinducción.

El sentido de rotación del rotor de motores asincrónicos depende de la dirección de rotación del campo magnético del estator. Para cambiar la dirección de rotación del campo magnético del estator es

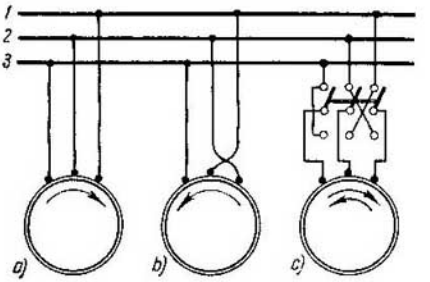


Fig. 407. Reversión de un motor asincrónico:
a, *b* — mediante la reconexión de los conductores, *c* — mediante el conmutador

necesario cambiar de lugares dos cualesquiera conductores de la línea que vayan al devanado del estator del motor.

En la fig. 407,*a* y *b* está representado esquemáticamente el cambio de dirección de rotación de un motor asincrónico. El cambio de lugares de los conductores conectados a cualquiera de las dos fases del estator, cambia el sentido de rotación del rotor del motor. Para este fin, al motor se le intercala un conmutador (fig. 407,*c*).

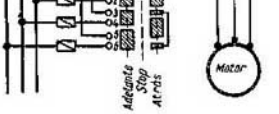


Fig. 408. Reversión de un motor mediante un combinador

En caso de mando a distancia del motor, cuando hay necesidad de cambiar la dirección de rotación, se le conecta al motor un arrancador magnético reversivo.

Con motores de gran potencia, la reversión (cambio del sentido de rotación) se realiza por medio de un instrumento especial, un

combinador (fig. 408). Aquí, los segmentos de cobre, fijados al tambor del combinador, se conectan al girar éste con los contactos fijos 1-6 y realizan las conexiones, desconexiones y conmutaciones necesarias.

§ 202. Regulación de la velocidad de rotación de los motores eléctricos

La *regulación de la velocidad de rotación de los motores de corriente continua* se puede realizar cambiando la tensión que se suministra al motor o variando la magnitud del flujo magnético del motor.

De la fórmula

$$n \approx \frac{U}{c\Phi}$$

se ve, que la velocidad de rotación de los motores de corriente continua es directamente proporcional a la magnitud de la tensión U e inversamente proporcional a la del flujo magnético Φ.

La variación de la magnitud de la tensión que se aplica al inducido del motor se puede efectuar conectando en serie al mismo una resistencia variable o mediante una conexión en serie y en paralelo de devanados de inducidos de varios motores. El último método se aplica para regular la velocidad del transporte electrificado (tranvías, locomotoras eléctricas).

Más a menudo se emplea para regular la velocidad el método de variar la magnitud del flujo magnético del motor. Para este fin, en el circuito del devanado inductor del motor se intercala un reóstato que da la posibilidad de realizar una regulación amplia y gradual de la velocidad del motor.

La *regulación de la velocidad de rotación de los motores asincrónicos* se realiza por uno de los siguientes procedimientos.

1. **Variación del número de polos del electromotor.** Para poder variar el número de pares de polos del motor, su estator se hace con dos devanados independientes o con un devanado que se pueda reconectar a diferentes números de polos.

En la fig. 409,*a* se muestran esquemáticamente dos bobinas de una fase conectadas en serie. Del dibujo se ve que las bobinas crean cuatro polos magnéticos.

Estas mismas bobinas conectadas en paralelo crearán sólo dos polos (fig. 409,*b*). La reconexión de los devanados del estator se realiza mediante un combinador. En este procedimiento la regulación de la velocidad de rotación del motor se efectúa a saltos.

En la práctica hay motores cuyas velocidades de sincronismo pueden ser iguales a 3.000, 1.500, 1.000 y 750 r.p.m.

La regulación de la velocidad de rotación del motor, variando el número de polos, se puede realizar solamente en los motores asín-

crónicos con rotor de jaula de ardilla. El rotor con devanado de jaula de ardilla puede funcionar con cualquier número de polos del estator. Al contrario, el motor con rotor bobinado puede funcionar normalmente sólo con un número determinado de polos del estator. En caso contrario sería necesario conmutar también el devanado del rotor, lo que complicaría demasiado el esquema del motor.

2. Variación de frecuencia de la corriente alterna. Al aplicar este procedimiento se varía, mediante un generador especial (convertidor de frecuencia), la frecuencia de la corriente alterna suministrada

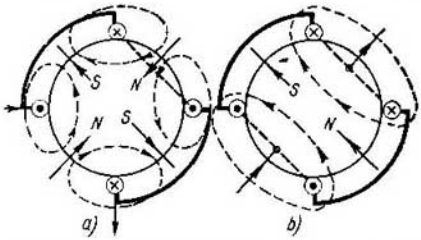


Fig. 409. Variación del número de pares de polos en el estator de un motor eléctrico

al devanado del estator del motor. Esta regulación es ventajosa cuando hay un gran número de motores que requieren regulación conjunta y gradual de la velocidad de rotación (transportadores de rodillos, máquinas textiles, etc.).

3. Introducción de una resistencia en el circuito del rotor. Los dos primeros procedimientos de regulación de la velocidad de rotación necesitan una ejecución especial del motor, o un generador especial (convertidor de frecuencia), y, por eso, no han adquirido amplia difusión.

El tercer procedimiento de regulación de la velocidad de rotación consiste en intercalar la resistencia de un reóstato regulador en el circuito del devanado del rotor durante el funcionamiento del motor. Es evidente, que tal procedimento de regulación de la velocidad de rotación es aplicable sólo para motores asincrónicos de rotor bobinado.

Examinemos los procesos físicos que tienen lugar en el motor al intercalar en el circuito de su rotor una resistencia.

El campo magnético giratorio del estator induce en el devanado del rotor una f.e.m. E_{2s}. Así, por ejemplo, durante el arranque, la f.e.m. del rotor es tan grande que el contacto con el circuito del rotor (reóstato) es peligroso.

Analicemos el caso cuando, con un deslizamiento determinado, en el devanado del rotor se induce una f.e.m. E_{2s}, que crea en el circuito del rotor una corriente I_2. Esta corriente I_2, interactuando con el campo magnético del estator Φ_1, crea un par de arranque igual al par de resistencia. Ahora, intercalemos en el circuito del rotor la resistencia del reóstato. En el primer momento el rotor girará con la misma velocidad, la f.e.m. E_{2s} del rotor creará una corriente menor que I_2, ya que la resistencia en el circuito ha aumentado.

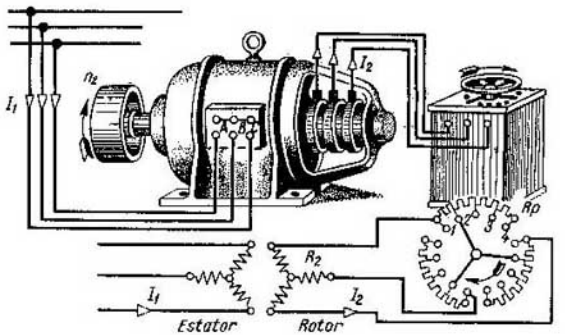


Fig. 410. Esquema de conexión de un motor asincrónico mediante un reóstato de arranque y regulación

Siendo menor la corriente que I_2, el par de arranque se hace menor que el par de resistencia en el árbol del motor, y el rotor disminuirá la velocidad de rotación hasta que una nueva f.e.m. mayor que E_{2s} del rotor cree la corriente anterior, capaz de restablecer conjuntamente con el campo del estator el par de arranque inicial. Por consiguiente, cada aumento de resistencia en el circuito del rotor va acompañado por un incremento del deslizamiento o disminución de la velocidad de rotación del motor.

El reóstato regulador se conecta al circuito del rotor del mismo modo que el de arranque. La diferencia en la construcción de los reóstatos regulador y de arranque consiste en que el regulador está calculado para un paso duradero de corriente. Para los motores, en los cuales la regulación de la velocidad de rotación se realiza variando la resistencia en el circuito del rotor, los reóstatos regulador y de arranque se reúnen en uno solo: un reóstato regulador de arranque.

El inconveniente de este procedimiento de regulación consiste en que en el reóstato regulador tiene lugar una pérdida notable de potencia, tanto mayor, cuanto más amplia es la regulación de la velocidad

de rotación del motor. En la fig. 410 se muestra el esquema de conexión de un motor asincrónico con reóstato regulador de arranque.

4. Mando mediante choques de saturación. Para regular la velocidad de los motores asincrónicos, en los últimos años, se emplean choques de saturación. En la fig. 411 se da el esquema de un choque

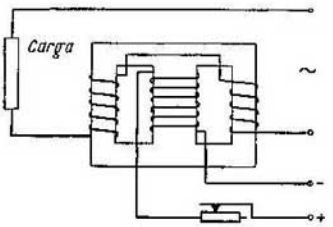


Fig. 411. Esquema de un choque de saturación

de saturación monofásico. Este tiene dos devanados: uno está conectado al circuito de corriente alterna, otro, que se denomina de control o de magnetización, se conecta a una fuente de tensión continua (rectificador). Al aumentar la corriente en el devanado de control, el sistema magnético del choque se satura y la reactancia inductiva del devanado de corriente alterna disminuye. Conectando choques a cada fase del motor asincrónico y variando la corriente del devanado de control, se puede cambiar la resistencia en el circuito del estator del motor y, por consiguiente, también la velocidad de rotación del motor.

Existen otros métodos para regular la velocidad de rotación de los motores asincrónicos, además de los indicados. Por ejemplo, regulación de la velocidad de rotación mediante la unión mecánica de dos motores asincrónicos, uno de los cuales funciona en el régimen de motor, otro, en el de contraconexión; regulación según el esquema con estator giratorio; regulación de la velocidad de rotación mediante un manguito asincrónico de deslizamiento; unión de motores en cascada y otros.

§ 203. Esquemas especiales de arranque y de regulación de la velocidad de rotación de los motores de corriente continua de gran potencia

Para arrancar los motores de corriente continua de gran potencia, así como para regular ampliamente su velocidad de rotación, se emplea el esquema de grupo generador-motor, o en forma abreviada G-M (elevadores de minas, trenes de laminado, mandos de naves,

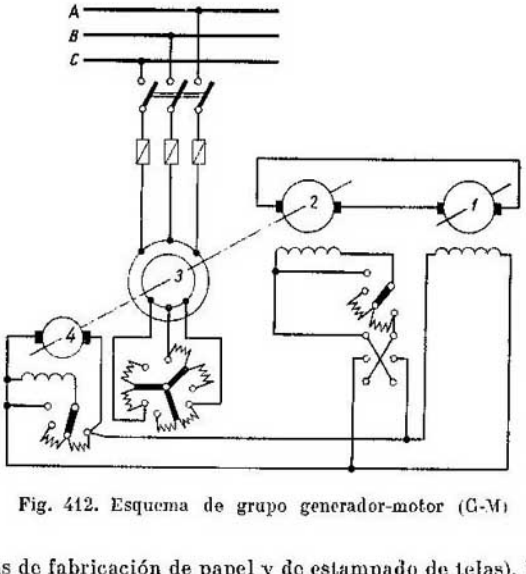


Fig. 412. Esquema de grupo generador-motor (G-M)

máquinas de fabricación de papel y de estampado de telas). El arranque y la regulación del motor según el esquema G-M (fig. 412) consiste en lo siguiente. El motor de servicio *1* recibe alimentación de un generador de corriente continua *2*, que se pone en movimiento por un motor sincrónico o asincrónico *3*. La excitación del motor de servicio y del generador se realiza de una excitatriz especial *4* asentada en el mismo árbol con el generador. Para arrancar el motor de servicio es necesario conectar el motor primario del generador. Alcanzada la velocidad de rotación normal por el generador, se reduce la resistencia del reóstato *5* en el circuito de excitación del mismo. La tensión del generador aumenta gradualmente hasta la magnitud nominal. El generador de servicio, en cuyas escobillas del inducido aumenta la tensión, se pone en rotación. Variando la resistencia del reóstato regulador en el circuito de excitación del generador, se puede cambiar la velocidad de rotación del motor de servicio.

El sistema G-M ofrece la posibilidad de realizar un arranque gradual y una regulación amplia de la velocidad de rotación del motor (100 : 1). Cuando el motor de servicio ha de cambiar la dirección de rotación, de acuerdo con las condiciones de trabajo, en el circuito de exitación del generador se instala un conmutador que cambia el sentido de la corriente en el devanado inductor, debido a lo cual, la polaridad de las escobillas cambia y el motor de servicio comienza a girar en dirección contraria.

En caso de oscilaciones bruscas de la carga sobre el árbol del motor (elevadores de minas, trenes de laminado), el arranque del motor se realiza según el esquema G-M con volante. Dicho esquema se diferencia del G-M por la presencia de un volante pesado en el árbol que une el motor primario con el generador. Para el funcionamiento con el volante se elige un motor primario con característica mecánica descendiente, es decir, al aumentar la carga sobre el árbol debe disminuir la velocidad de rotación del motor. El aumento de la carga sobre el árbol del motor de servicio originará un incremento de la corriente que el motor toma del generador. La potencia necesaria para hacer girar el generador cargado crece. Si no hay volante, el motor primario tomará toda la potencia suplementaria de la red, provocando oscilaciones bruscas de la corriente. Las oscilaciones de la corriente disminuirán si en el árbol del motor primario hay un volante. Durante su rotación el volante pesado dispone de una reserva de energía cinética. Al aumentar la carga del generador, la velocidad de rotación del motor primario disminuye y la energía cinética liberada del volante hace posible compensar las oscilaciones bruscas de la carga mecánica sobre el árbol del motor de servicio *1*.

Al disminuir la carga del motor de servicio, el motor primario aumenta la velocidad y el volante acumula energía cinética.

§ 204. Frenado de los motores eléctricos

Si quitamos la carga del motor eléctrico y lo desconectamos de la red, éste girará cierto tiempo por inercia. El tiempo de su frenado será particularmente largo si el motor dispone de gran masa y velocidad. Pero durante el trabajo del motor son posibles frecuentes arranques y rápidos frenados (máquinas herramienta, grúas, elevadores, etc.). Es necesario señalar que un frenado rápido del motor tiene mayor importancia que un rápido arranque. Si la dilatación durante el arranque del motor lleva sólo a la parada del utillaje, la demora durante el frenado puede provocar la rotura del mecanismo, averías y graves accidentes del personal.

El frenado de motores puede ser realizado de modo mecánico y eléctrico.

El frenado mecánico se hace mediante un freno de cinta o de zapatas. En la fig. 413 está representado el esquema de principio de un freno de cinta con desenfrenamiento electromagnético. Sobre la polea *1* del motor hay puesta una cinta de acero *2* con zapatas de madera fijadas a ésta. Sobre el soporte *3* gira a charnela la palanca de freno *4* con peso *5* en el extremo. Los extremos de la cinta se fijan a los salientes de la palanca *6*. Cuando la bobina *7* está desconectada, la palanca del freno ocupa, bajo la acción del peso, la posición extrema inferior, y los salientes de la palanca estiran la cinta de acero que sujeta la polea del motor mediante las zapatas.

Para arrancar el motor, se conecta a la red la bobina *7*, la cual

atrae el núcleo de acero unido a charnela con la palanca de freno. La palanca se eleva, la cinta se afloja y la polea del motor se desenfrena.

El frenado mecánico se emplea a menudo en las grúas. En este caso la energía cinética del motor se transforma en térmica, que se pierde en las zapatas del freno o en la cinta.

El **frenado eléctrico** puede ser efectuado: 1) por medio de conexión del inducido del motor, desconectado de la red, a una resistencia (frenado dinámico); 2) recuperando la energía a la red (recuperación); 3) mediante la conmutación del motor a la rotación inversa

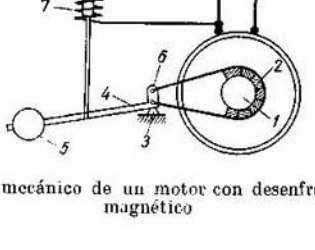


Fig. 413. Frenado mecánico de un motor con desenfrenamiento electromagnético

(frenado con contracorriente). En el frenado eléctrico la energía cinética del motor se transforma en eléctrica.

El *frenado del motor por medio de conexión del inducido a una resistencia* consiste en lo siguiente. Para frenar el motor, el devanado del inducido se desconecta de la red y se cierra a la resistencia de freno, mientras que el devanado inductor del motor queda conectado a la red. La corriente en el devanado del inducido durante el trabajo del motor es igual á:

$$I_{ind} = \frac{U - E}{R_{ind}},$$

y el sentido de la corriente del inducido coincide con el de la tensión de la red (fig. 414).

Al desconectar el inducido de la red y cerrar su devanado a la resistencia, la corriente del inducido será:

$$-I = \frac{-E}{R_{ind} + R}.$$

La fuerza contraelectromotriz E, que se induce en el devanado del inducido al girar el motor, tiene dirección contraria a la de la tensión de la red. Por lo tanto, la corriente que origina pasará en dirección contraria a la que tenía durante el trabajo del motor. El

cambio de la dirección de la corriente en el devanado del inducido, sin cambiar de dirección la corriente en el devanado inductor conducirá a que el motor, girando en el mismo sentido, desarrolle un par dirigido en sentido contrario, es decir, se frenará. A medida que el motor se vaya parando, la fuerza contraelectromotriz disminuirá, lo mismo que el par de frenado. El motor se frenará tanto más rápidamente, cuanto menor sea la resistencia de frenado. Si en el momento de frenado desconectamos de la red simultáneamente con el inducido los extremos del devanado inductor, el flujo magnético del motor disminuirá junto con la fuerza contraelectromotriz y no tendrá

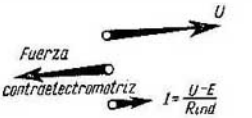


Fig. 414. La tensión de la red, la fuerza contraelectromotriz y la corriente de un electromotor durante su trabajo

lugar un frenado rápido. Para frenar un motor con excitación en derivación, como se ve de la fig. 415, no hace falta reconectar el devanado inductor. Examinemos el frenado de un motor con excitación en serie, conectando el inducido a una resistencia. Si desconectamos los terminales del motor y los cerramos a una resistencia de freno, la dirección de la corriente cambiará simultáneamente tanto en el devanado del inducido, como en el devanado inductor, por eso, el motor no se frenará. Para evitar esto, en el momento de frenado, el devanado inductor del motor se conmuta de modo que la dirección de la corriente en éste no varíe. Para los motores con excitación compuesta, el frenado eléctrico por medio de la conexión del inducido a una resistencia se realiza igual que para los motores con excitación en derivación.

El *frenado eléctrico con entrega de la energía a la red* (recuperación) es posible, cuando la fuerza contraelectromotriz del motor llega a ser mayor que la tensión de la red. Esto puede ocurrir: 1) si la tensión de la red disminuye; 2) si el motor se superexcita; 3) si la velocidad de rotación del motor es mayor que la velocidad en vacío. En todos estos casos la dirección de la corriente en el devanado del inducido cambia por la contraria y el motor, girando en el mismo sentido a cuenta de la energía cinética, se convierte en un generador, entregando a la red la energía eléctrica. El inducido del motor desarrolla un par de frenado, debido a lo cual la velocidad del inducido disminuye hasta que la fuerza contraelectromotriz llegue a ser igual a la tensión de la red. El aumento de la velocidad, que se determina en el momento dado por la tensión y el flujo magnético, puede ocurrir, por ejemplo, en el motor de una grúa bajo la acción del peso de una

carga descendente o en el motor de una locomotora eléctrica (tranvía) que va cuesta abajo.

En un motor con excitación en derivación, el frenado, mediante la recuperación de la energía a la red, se realiza automáticamente, sin conmutaciones. En los motores con excitación en serie no se puede realizar el frenado sin conmutaciones, ya que la dirección de la corriente cambia simultáneamente en el devanado del inducido y en el devanado inductor.

Los motores con excitación compuesta se pueden frenar elevando la velocidad de rotación por encima de la velocidad en vacío, sólo

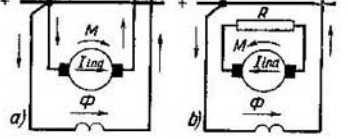


Fig. 415. Frenado de un motor eléctrico cerrando el inducido a una resistencia: *a* — esquema del motor antes del frenado, *b* — esquema del motor en el momento de frenado

cuando existe la influencia predominante del devanado inductor en paralelo.

El *frenado conmutando la rotación del motor en dirección contraria* (frenado por contracorriente) consiste en que el devanado del inducido de un motor en funcionamiento se conmuta y la dirección de la corriente en éste cambia por la contraria. En este caso la corriente en el devanado del inducido es igual a:

$$I_{ind} = \frac{-U - E}{R_{ind}},$$

es decir, será proporcional no a la diferencia entre U y E, sino a su suma. Por eso, en el primer momento la magnitud de la corriente en el devanado del inducido será particularmente grande (de 20 a 40 veces mayor que la nominal), el motor recibe un potente empuje mecánico y el calor que desprende el devanado en este período es peligroso tanto para el devanado, como para su aislamiento. Después de conmutar el devanado del inducido a la contramarcha, el motor, continuando la rotación en el mismo sentido, desarrolla un elevado par de frenado.

Al emplear el método mencionado de frenado, es necesario desconectar a tiempo el motor de la red, ya que en caso contrario, después de pararse éste, comienza a girar en sentido contrario. El frenado por contracorriente en la forma descrita se utiliza en casos

exclusivos, debido a las graves consecuencias que esto trae para el motor. Pero, si en el momento de conmutación del devanado del inducido introducimos en el circuito del devanado la resistencia de un reóstato de arranque, la corriente no producirá gran empuje.

Los motores asincrónicos pueden trabajar en los siguientes regímenes de frenado: de generador, de contracorriente y dinámico.

El *frenado de generador en los motores asincrónicos* es posible si la velocidad es superior a la de sincronismo. En este caso, la máquina, funcionando como generador, se frena, entregando energía a la red.

El *frenado por contracorriente* se realiza conmutando durante el funcionamiento dos fases cualesquiera del motor. En este caso, el motor, continuando la rotación por inercia, desarrolla un par de arranque que actúa en sentido contrario. Cuando el motor se para es necesario desconectarlo de la red, de otro modo éste comenzará a girar en sentido contrario.

El *frenado dinámico* de un motor asincrónico se realiza mediante la conexión del devanado del estator a una tensión continua.

§ 205. Esquemas de control de los motores eléctricos mediante aparatos electromagnéticos

1. Control de un motor asincrónico con rotor de jaula de ardilla (fig. 416). En este esquema se usan dos contactores L y T, dos relés térmicos 1 R_{term} y 2 R_{term} y relé de control de velocidad R_{cv}. El circuito para alimentar el devanado del estator se denomina aquí circuito de fuerza. El cierre y la apertura del circuito de fuerza se efectúa por los contactos de las líneas T y L de los contactores correspondientes. El mando de las bobinas de los contactores se realiza por parte del circuito de control del esquema. El relé R_{cv} está acoplado con el árbol del motor, y a una velocidad determinada del motor los contactos normalmente desconectados de dicho relé se cierran.

Al apretar el botón «arranque» se excita la bobina del contactor L, el cual cierra los contactos L en el circuito de fuerza del motor. El bloque-contacto L pone en shunt el botón «arranque» y se puede dejar de apretarlo. Al mismo tiempo, otro contacto L (normalmente cerrado) abre el circuito de la bobina del contactor T, que no puede conectarse, a pesar de que se cierra el contacto del relé R_{cv}.

Al apretar el botón «stop», el circuito del contactor L se abre, los contactos L en el circuito de fuerza se abren, y el motor se desconecta de la red. El contacto L, normalmente cerrado, se cierra, lo que conduce a la excitación de la bobina del contactor T, el cual cierra sus contactos en el circuito de fuerza. Como se ve en el esquema, dos fases cambian de lugar, y el motor, girando en el mismo sentido, desarrolla un par en dirección contraria a la rotación. Tiene lugar el frenado con contracorriente. Tan pronto como la velocidad del motor llegue a ser igual a un 10 ó 15% de la nominal, los contactos del relé R_{cv} se abren y el motor se desconecta de la red. La desconexión

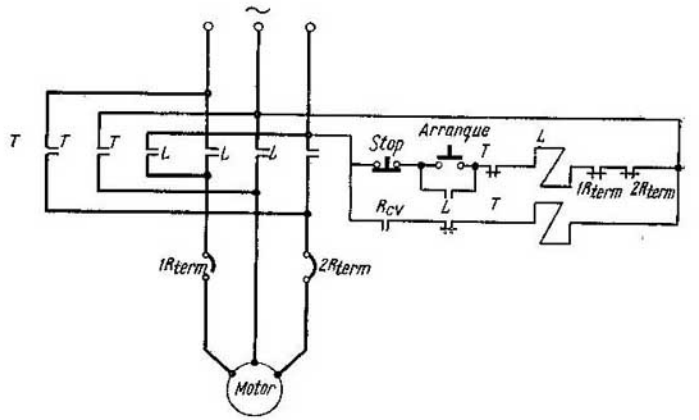


Fig. 416. Esquema de control de un motor asincrónico con rotor de jaula de ardilla

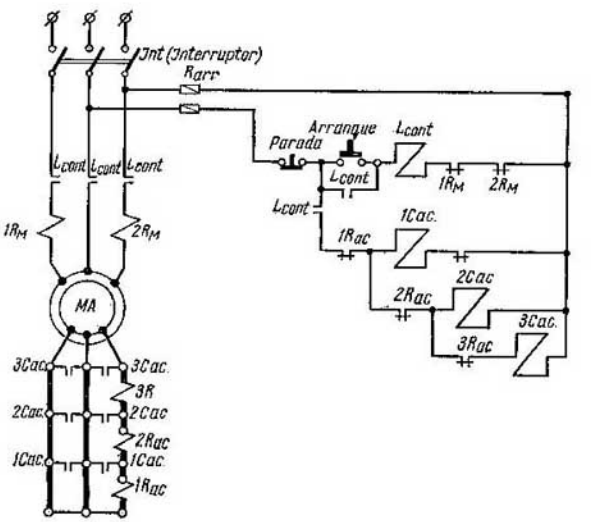


Fig. 417. Esquema de control de un motor asincrónico de rotor bobinado

del motor puede ocurrir automáticamente. En caso de sobrecarga del motor, los relés térmicos abren sus contactos en el circuito del contactor L, y el motor se desconecta de la red.

2. **Esquema de control del motor asincrónico de rotor bobinado** (fig. 417). En el esquema se emplean cuatro contactores: contactor de la línea L y tres contactores de aceleración $1C_{ac}$, $2C_{ac}$ y $3C_{ac}$. En el circuito del rotor están conectadas resistencias de arranque. En este mismo circuito están las bobinas de los relés de corriente de aceleración $1R_{ac}$, $2R_{ac}$ y $3R_{ac}$. Dichos relés están regulados de modo que la corriente de conexión del relé $1R_{ac}$ es mayor que la de desconexión de los relés $2R_{ac}$ y $3R_{ac}$ y la del $2R_{ac}$ es mayor que la del $3R_{ac}$.

Al apretar el botón «arranque» se conecta el contactor de la línea, que con sus contactos cierra el circuito de fuerza de alimentación del devanado del estator del motor. Al mismo tiempo, el bloque-contacto L pone en shunt el botón «arranque», el cual se puede soltar. Debido a las grandes corrientes en las resistencias de arranque, durante la puesta en marcha del motor se excitan las bobinas de los tres relés de aceleración, las cuales abrirán sus contactos en los circuitos de los contactores de aceleraciones $1C_{ac}$, $2C_{ac}$ y $3C_{ac}$.

Tan pronto como la corriente en el circuito del rotor disminuya hasta la magnitud de la corriente de desconexión del relé $1R_{ac}$, éste se desconecta y cierra con su contacto el circuito del contactor $1C_{ac}$, el cual cerrará sus contactos $1C_{ac}$ en el circuito del rotor y el primer grupo de resistencias será cortocircuitado. A medida que disminuya la corriente en el circuito del rotor, cesan su trabajo, primero, el relé $2R_{ac}$, después, el $3R_{ac}$. En el circuito de control se excitan el contactor $2C_{ac}$, que cortocircuita el segundo grupo de resistencias en el circuito del rotor, después $3C_{ac}$ que cortocircuita el último escalón de las resistencias de arranque. Dos relés de máxima $1R_M$ y $2R_M$ desconectan el motor de la red en caso de cortocircuito o de sobrecarga en el motor.

3. **Esquema de control del motor de corriente continua con excitación en derivación** (fig. 418). El esquema prevé la posibilidad de arranque, frenado y reversión del motor.

El control del motor se efectúa mediante un combinador de mando que tiene tres posiciones: cero, $CM0$; adelante, $CM1$, y atrás, $CM2$. Los contactos $CM0$ normalmente están cerrados. Al circuito de fuerza están conectados: el devanado del relé de corriente de máxima R_M, el devanado del inducido del motor y la resistencia de arranque. La alimentación al circuito de fuerza se suministra por medio del interruptor de cuchilla $1Int$. El circuito auxiliar se alimenta a través del interruptor de cuchilla $2Int$. En este circuito están conectados el devanado inductor en paralelo D_{ind} del motor, la resistencia regu-

ladora R_R y la bobina del relé de interrupción del campo $R_{I.C.}$. Con el fin de proteger el devanado inductor contra sobretensiones durante las desconexiones, éste se conecta a la resistencia de descarga R_D. Para arrancar el motor se conectan los interruptores $1Int$ y $2Int$, con lo cual el devanado inductor D_{ind} del motor recibe alimentación y se excita el $R_{I.C.}$. El relé $R_{I.C.}$ cierra su contactor en el circuito

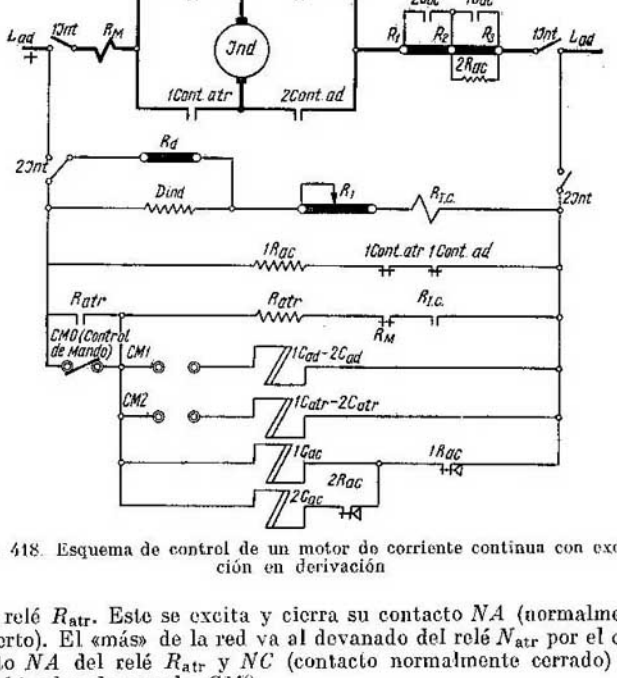


Fig. 418. Esquema de control de un motor de corriente continua con excitación en derivación

del relé R_{atr}. Este se excita y cierra su contacto NA (normalmente abierto). El «más» de la red va al devanado del relé N_{atr} por el contacto NA del relé R_{atr} y NC (contacto normalmente cerrado) del combinador de mando $CM0$.

Después, el relé $1R_{ac}$ abre su contacto NC en el circuito de los contactores $1C_{ac}$ y $2C_{ac}$. Al pasar la manivela del combinador de mando a la posición «adelante»—$CM1$, se excita el contactor $1C_{ad}$ — $2C_{ad}$, que cierra sus dos contactos en el circuito de fuerza. El motor comienza a trabajar. En la resistencia de arranque del motor tiene lugar una caída de tensión. Por eso, se excita la bobina del relé $2R_{ac}$ conectada en paralelo al primer escalón de las resistencias y abre su contacto en el circuito del contactor $2C_{ac}$. Al conectar el contactor $1C_{ad}$—

$2C_{at}$ su contacto en el circuito $1R_{ac}$ se abre y el relé $1R_{ac}$ se desconecta. Como resultado de esto, el contacto $1R_{ac}$ se cierra con cierto retardo, el contactor $1C_{ac}$ se conecta y con su contacto pone en shunt el primer escalón de las resistencias de arranque.

Después el esquema funciona del modo siguiente. El relé $2R_{ac}$ pierde la excitación y con cierto retardo cierra su contacto en el circuito del contactor $2C_{ac}$. Se cortocircuita el segundo escalón de resistencias de arranque y a las escobillas del inducido se les proporciona la tensión completa de la red. Para la reversión del motor, la manivela del combinador de mando se pasa a la posición «atrás», *CM*2. En este caso se conecta el contactor $1C_{atr}$ — $2C_{atr}$ y cierra sus contactos en el circuito de fuerza. La dirección de la corriente en el devanado del inducido del motor se invierte. En lo demás, el esquema funciona de modo análogo al descrito más arriba.

Si la corriente del motor supera la del relé de máxima R_M, éste abrirá sus contactos en el circuito R_{atr} y el motor se desconectará de la red. La ruptura del circuito de excitación del motor con excitación en derivación puede llevar al aumento brusco de la velocidad de rotación, peligroso para el motor. Por eso, al desaparecer la corriente en el devanado inductor, el relé $R_{I.C}$ abrirá su contacto en el circuito R_{atr} y el motor se desconectará de la red.

La regulación de la velocidad de rotación se efectúa por medio de la resistencia reguladora R_R.

4. Esquema de control irreversible del motor de corriente continua con excitación en serie. En el esquema (fig. 419) se emplean 4 contactores: *L*, de la línea; $1C_{ac}$ y $2C_{ac}$, contactores de aceleración, y C_f, contactor de frenado. En el esquema se emplean también cinco relés: dos relés de máxima $1R_M$ y $2R_M$, dos relés de aceleración $1R_{ac}$ y $2R_{ac}$, el relé de frenado R_F.

El cierre del interruptor de cuchilla provocará la conexión del relé $1R_{ac}$. La corriente pasará del «más» de la red por la bobina del relé $1R_M$, por el relé $1R_{ac}$, el devanado del inducido, el devanado inductor en serie D_{ind}, la resistencia de arranque $R_3 - R_1$, el devanado del relé $2R_M$ al «menos» de la red. La resistencia de la bobina del relé $1R_{ac}$ es grande. Por eso, la corriente que pasa en este período por el circuito no puede poner en rotación el motor. El relé $1R_{ac}$ conectándose abrirá su contacto en el circuito de los contactores $1C_{ac}$ y $2C_{ac}$.

Al apretar el botón «arranque», se conecta el contactor de la línea *L* y con su contacto en el circuito de fuerza cierra el circuito del motor. Al mismo tiempo, en el circuito de control se conecta el bloque-contacto que pone en shunt el botón «arranque» y se abre el contacto normalmente cerrado del contactor *L* en el circuito del contactor C_f. El motor comienza a trabajar, teniendo en el circuito del inducido la resistencia de arranque completa.

La caída de tensión en la resistencia de arranque $R_3 - R_1$ crea una tensión entre los puntos R_2 y R_1, el relé $2R_{ac}$, excitándose,

abrirá su contacto en el circuito del contactor $2C_{ac}$. La conexión del contactor L provocará el cierre de la bobina del relé $1R_{ac}$, el cual cerrará con cierto retardo su contacto en el circuito del contactor $1C_{ac}$. El cierre del contactor $1C_{ac}$ en el circuito de fuerza hará que el primer escalón de resistencia de arranque se excluya del esquema. Además, la bobina $2R_{ac}$, después de perder la excitación, cerrará

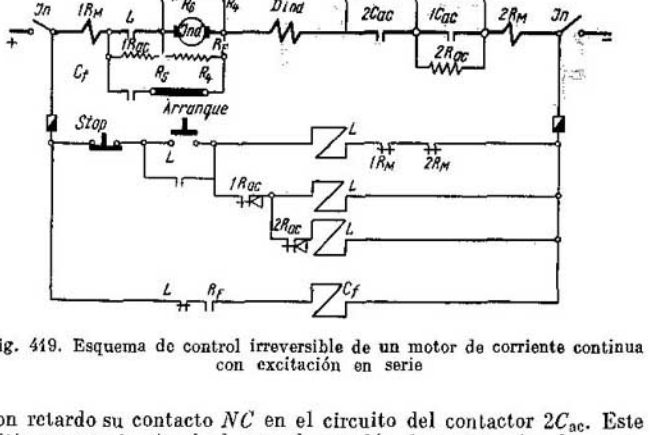


Fig. 419. Esquema de control irreversible de un motor de corriente continua con excitación en serie

con retardo su contacto NC en el circuito del contactor $2C_{ac}$. Este último cortocircuitará el segundo escalón de resistencias de arranque.

Durante el trabajo del motor, el relé R_F está excitado y su contacto en el circuito del contactor C_f está cerrado. Pero el contactor no puede conectarse, ya que el contactor L en su circuito está abierto durante el funcionamiento del motor. La desconexión del motor se realiza apretando el botón «stop». En este caso, los contactores L, $1C_{ac}$ y $2C_{ac}$ se desconectan y el motor se desconecta de la red. El relé R_F estará excitado a cuenta de la fuerza contraelectromotriz.

Después se conecta el contactor C_f y cierra sus dos contactos en el circuito de fuerza. Un contacto del contactor C_f cierra el devanado del inducido del motor a la resistencia $R_6 - R_4$, y a través del otro contacto y la resistencia $R_5 - R_4$ se cierra el circuito del devanado inductor del motor.

El motor se frena cerrándose su inducido a la resistencia. La disminución de la velocidad de rotación del motor trae consigo la reducción de la fuerza contraelectromotriz, y a una velocidad aproximadamente igual a un 20% de la nominal, el relé R_f abre el circuito del contactor C_f y este último desconecta el esquema.

§ 206. Control de los motores eléctricos por medio de combinadores

La construcción de los combinadores la hemos estudiado en el § 196. Para su representación esquemática se hace un corte mental de los combinadores y se despliegan en un plano. En este caso, los segmentos adquieren la forma de rectángulos alargados y los bulones

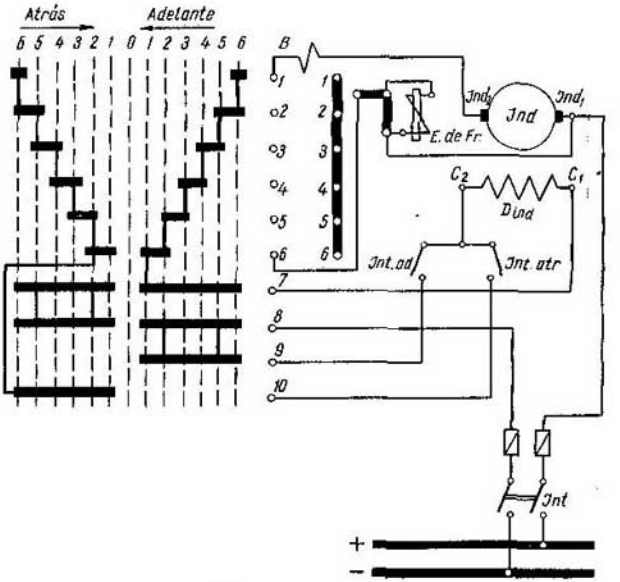


Fig. 420. Esquema de control de un motor de corriente continua mediante un combinador de tambor

del combinador se expresan con círculos. Los bulones del combinador y las resistencias designadas con las mismas cifras no se unen generalmente en los esquemas. El número de posiciones del combinador se indica con líneas verticales punteadas.

En la fig. 420 se da el esquema de control del motor de corriente continua con excitación en serie mediante un combinador de tambor. Este esquema puede ser aplicado para controlar el motor de corriente continua del accionamiento de un carro o puente en grúas-puente. Dicho esquema del combinador tiene interruptores de fin de carrera Int_{ad} o Int_{atr}, electroimán de frenado E_{fr}, bobina apagachispas B. El combinador dispone de 6 posiciones de rotación a derecha e izquierda

del motor. Los contactos (bulones) 1—10 del combinador expuestos en el esquema a la derecha de los segmentos, en realidad están dispuestos por la línea vertical que corresponde a la posición neutra.

Conectemos el interruptor de cuchilla *Int*, pongamos el combinador en la primera posición «adelante». Los segmentos cerrarán los bulones 6 y 7, 8 y 9. Se formará el siguiente circuito de la corriente: la barra «más», el devanado del inducido del motor (Ind_1 — Ind_2), la bobina apagachispas B, toda la resistencia de arranque 1-6, el devanado inductor del motor D_{ind} (C_1 y C_2), el interruptor de fin de carrera hacia adelante Int_{ad} y la barra «menos».

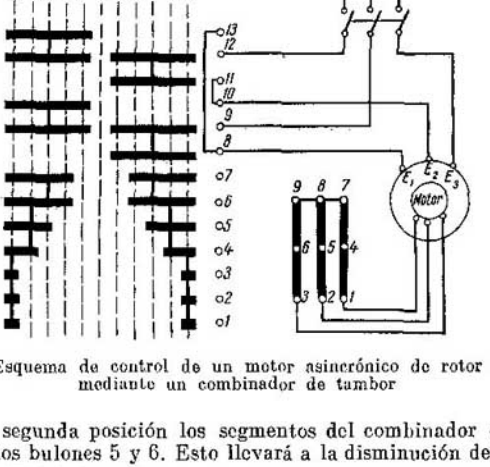


Fig. 421. Esquema de control de un motor asincrónico de rotor bobinado mediante un combinador de tambor

En la segunda posición los segmentos del combinador cortocircuitarán los bulones 5 y 6. Esto llevará a la disminución de la resistencia de arranque.

En las posiciones siguientes—tercera, cuarta y quinta—la resistencia de arranque se derivará por etapas y, al fin, en la sexta posición se quitará por completo.

Conviene prestar atención a la dirección de la corriente en el devanado del inducido y en el inductor del motor. En las seis posiciones de marcha «adelante» la corriente en el devanado del inducido ha fluido desde Ind_1 hacia Ind_2 y en el devanado inductor desde C_1 hacia C_2.

En la primera posición de marcha «atrás» se forma el siguiente circuito de la corriente: la barra «más», el devanado del inducido, la bobina apagachispas B, el bulón 1, toda la resistencia de arranque 1-6, el bulón 6, el bulón 10, el interruptor de fin de carrera hacia atrás Int_{atr} el devanado inductor del motor (desde C_2 hacia C_1), el

bulón 7, el bulón 8 y la barra «menos». Es fácil notar, que la dirección de la corriente en el devanado del inducido permanece igual, y, en el inductor, se cambia por la contraria. Por eso, la dirección de rotación del motor se cambia también por la contraria. El devanado del electroimán E_{fr} está conectado en paralelo al motor y realiza el desenfrenamiento durante la puesta en marcha del motor. Al desconectar el motor, éste se frena mecánicamente.

En la fig. 421 se da el esquema de control de un motor asincrónico de rotor bobinado mediante un combinador de tambor. En la primera posición de marcha «adelanto» los segmentos del combinador cierran los bulones 11 y 12, 8 y 9, formándose los siguientes circuitos de la corriente: 1) línea L_1 el bulón 12, el bulón 11, el bulón 10, el borne del estator E_2; 2) línea L_2, el bulón 9, el bulón 8, el borne del estator E_1; 3) línea L_3, el borne del esator E_3. En el circuito del rotor hay una resistencia de arranque completa.

En la segunda posición de marcha «adelante» los segmentos cierran los bulones 6 y 7, lo que conduce al cierre parcial de la resistencia de arranque. En las posiciones siguientes del combinador, la resistencia de arranque se desconecta completamente y se pone en cortocircuito.

Al permutar el combinador a la posición «atrás», el esquema funciona de modo análogo a la posición «adelante», diferenciándose sólo en que las fases del estator reciben alimentación de otros conductores de la red (dos fases intercambian de lugar).

Preguntas de control

1. ¿Qué es un accionamiento eléctrico?
2. ¿Qué es un accionamiento eléctrico de grupo, individual, polimotr?
3. ¿Según qué indicios se puede clasificar los electromotores?
4. ¿Qué datos se indican en la ficha técnica de los electromotores?
5. ¿Cuáles son los regímenes de trabajo de los electromotores?
6. ¿Qué aislamiento se emplea en las máquinas eléctricas y cuál es la temperatura máxima tolerable de calentamiento para cada clase de aislamiento?
7. ¿Cuáles son los tipos de máquinas eléctricas?
8. ¿Cómo se efectúa la refrigeración de las máquinas eléctricas?
9. ¿Cómo se clasifican los motores según la característica mecánica (de velocidad)?
10. ¿Cuáles son los modos de frenado de los motores eléctricos?
11. ¿Cómo se puede cambiar la dirección de rotación de los motores eléctricos?
12. ¿Cómo se regula la velocidad de rotación de los motores eléctricos?
13. ¿Qué métodos existen para arrancar los motores eléctricos?
14. ¿Qué aparatos existen para controlar los motores eléctricos?

XVI

BATERIAS DE ACUMULADORES

§ 207. Generalidades

Las baterías de acumuladores están formadas por acumuladores de plomo o alcalinos; los primeros han adquirido mayor difusión.

Las *baterías de acumuladores estacionarios de plomo* constan de acumuladores tipo C (estacionarios para servicios prolongados de descarga) o CK (estacionarios para servicios breves de descarga). Los acumuladores CK se diferencian de los del tipo C por las láminas reforzadas de unión. Las cifras que van después de la sigla caracterizan su capacidad, corrientes de descarga y carga. Las fábricas producen acumuladores con marcas desde C-1 (CK-1) hasta C-148(CK-148).

Los acumuladores tipo C están destinados para una descarga de 3 a 10 horas; la corriente de descarga máxima que se permite durante 3 horas es de 9 A. Los acumuladores CK pueden descargarse durante un plazo más corto, hasta en una hora; la corriente de descarga máxima que se permite durante una hora es de 18,5 A.

La corriente de descarga de corta duración (durante no más de 5 seg) no debe superar el 250% de la de descarga durante tres horas para acumuladores tipo C y el 250% de la corriente de descarga durante una hora para acumuladores tipo CK.

Durante la carga se permite una corriente máxima de carga de 9 A para acumuladores tipo C, y de 11 A para los de tipo CK.

La magnitud de la capacidad, indicada para cada tipo de acumuladores, varía entre amplios límites en dependencia de la magnitud de la corriente de descarga y del régimen de descarga.

Las características principales de los acumuladores C-1 y CK-1 se dan en la tabla 19.

Haciendo uso de la tabla dada, se puede determinar la capacidad y la corriente de descarga de cualquier acumulador. Para eso es necesario multiplicar los datos de la tabla por el número del acumulador. Por ejemplo, para el acumulador CK-6 en caso de descarga durante 2 horas, la capacidad $Q = 22 \cdot 6 = 132$ A-h (amperios-hora), y la corriente de descarga $I_d = 11 \cdot 6 = 66$ A.

Tabla 19

Característica técnica de acumuladores C-1 y CK-1

Características	CK-1		C-1 y CK-1			
Duración de descarga:						
en horas	1	2	3	5	7,5	10
Capacidad:						
en amperios-hora	18,5	22	27	30	33	36
en % del servicio de 10 horas	51,4	61,1	75	83,3	91,7	100
Corriente de descarga:						
en amperios	18,5	11	9	6	4,5	3,6
en % del servicio de 10 horas	514	305	250	166	125	100
Corriente máxima de carga, en A	11	11	9	9	9	9
Potencial final de descarga, en V	1,75	1,75	1,8	1,8	1,8	1,8

Las fábricas producen acumuladores de plomo para la capacidad nominal de 10 horas, de 36 a 5·328 A-h. Los datos de los acumuladores C y CK están expuestos en la tabla 20.

Para baterías de acumuladores estacionarios se emplean también acumuladores de plomo de tipo acorazado СП y СПК (estacionarios acorazados). Para baterías de acumuladores portátiles se utilizan acumuladores de plomo tipo СТ (de arranque).

Las *baterías de acumuladores alcalinos* están compuestas de acumuladores de hierro y níquel tipo ЖН y ТЖН. Los datos de los acumuladores de hierro y níquel se representan en la tabla 21.

El número del acumulador corresponde a su capacidad nominal en amperios-hora. Para los acumuladores ТЖН-22, ЖН-45, ЖН-60 y ЖН-100 la capacidad está determinada para servicio de 8 horas de descarga hasta la tensión de 1,1 V, y para los acumuladores ТЖН-250, ЖН-300, ЖН-350 y ЖН-500, para 5 horas de descarga hasta la tensión de 1 V.

La carga de los acumuladores se efectúa con corriente de régimen normal de carga durante 6-7 horas. Se admite una carga acelerada en el régimen siguiente: primeramente, durante 2,5 horas, con corriente dos veces mayor que la normal, después, durante 2 horas con corriente de magnitud normal.

La cantidad de horas de descarga se determina dividiendo la capacidad del acumulador en amperios-hora por el valor de la corriente de descarga en amperios.

Para baterías de acumuladores portátiles se utilizan acumuladores de hierro y níquel 10-ЖН de 12,5 V de potencial; 4ЖН, de 5 V; 5ЖН, de 6,5 V.

Tabla 20

Característica técnica de los acumuladores de plomo C y CK

Nº de acumulador	Tipo de placas	Cantidad de placas		Dimensiones exteriores del recipiente, en mm			Cantidad de electrólito, en litros	Peso total, en kg	Elementos de acumuladores tipo CK			Elementos de acumuladores tipo C				Corriente máxima de carga en A
									Carga en una hora			Descarga, en 3 horas		Descarga, en 10 horas		
		positivas	negativas	longitud	anchura	altura			capacidad, en A-h	corriente de carga, en A	corriente máxima de descarga, en A	capacidad, en A-h	corriente de descarga, en A	capacidad en A-h	corriente de descarga, en A	
1	H-1	1	2	80	215	270	4,0	14,2	18,5	18,5	11	27	9	36	3,6	9
2	H-1	2	3	130	215	270	6,6	22,5	37	37	22	54	18	72	7,2	18
3	H-1	3	4	180	215	270	9,0	30,0	55,5	55,5	33	81	27	108	10,8	27
4	H-1	4	5	230	215	270	11,0	36,2	74	74	44	108	36	144	14,4	36
5	H-1	5	6	230	215	270	10,5	41,0	92,5	92,5	55	135	45	180	18,0	45
6	H-2	3	4	195	220	485	16,0	51,8	111	111	66	162	54	216	21,6	54
8	H-2	4	5	195	220	485	15,5	60,0	148	148	88	216	72	288	28,8	72
10	H-2	5	6	260	220	485	20,0	76,3	185	185	110	270	90	360	36,0	90
12	H-2	6	7	270	220	485	19,5	84,2	222	222	132	324	108	432	43,2	108
14	H-2	7	8	295	220	485	21,0	93,7	259	259	154	378	126	504	50,4	126
16	H-2	8	9	345	220	485	27,0	112,0	296	296	176	432	144	576	57,6	144
18	H-2	9	10	395	220	485	30,0	126,0	333	333	198	486	162	648	64,8	162
20	H-2	10	11	425	220	485	31,0	133,0	370	370	220	540	180	720	72,0	180

Tabla 21

Característica técnica de los acumuladores de hierro-níquel

Tipo	Capacidad nominal, en A-h	Corriente nominal de carga en 7 horas de servicio, en A	Corrientes nominales de descarga (A) y tensiones límites correspondientes al descargar					Dimensiones, en mm			Peso, en kg	
			8 horas hasta 1,1 V	5 horas hasta 1,0 V	3 horas hasta 0,8 V	2 horas hasta 0,65 V	1 hora hasta 0,5 V	anchura	longitud (con muñones)	altura (con bornes)	sin electrólito	con electrólito
ЖН-22	22	5,5	2,75	4,4	7,33	11	22	32	125	213	1,41	1,73
ЖН-45	45	11,25	5,65	9	15	22,5	45	53	125	213	2,31	2,85
ЖН-60	60	15,0	7,5	12	20	30	60	45	152	349	3,88	4,78
ЖН-100	100	25,0	12,5	20	33,3	50	100	70	152	349	5,40	6,80
ТЖН-250	250	62,5	31,3	50	83,3	125	250	118,5	176	375	12,6	15
ТЖН-300	300	75,0	37,5	60	100	150	300	118,5	176	440	14,3	18,5
ТЖН-350	350	90,0	43,7	70	115	175	350	141,5	176	520	19,5	25
ТЖН-500	500	125,0	62,5	100	166,5	250	500	141,5	176	550	21,0	28,2

§ 208. Conmutadores de elementos

Durante el funcionamiento de una batería de acumuladores, el potencial de cada elemento disminuye. Si no se toman medidas especiales, la tensión en las barras de la batería de acumuladores también disminuirá. Por lo tanto, a medida que se descargue la batería hay que conectar a los acumuladores en funcionamiento elementos nuevos (frescos), suplementarios. De este modo, una batería de acumuladores está compuesta de un cierto número de elementos que funcionan constantemente y de varios elementos que se conectan y desconectan según la necesidad.

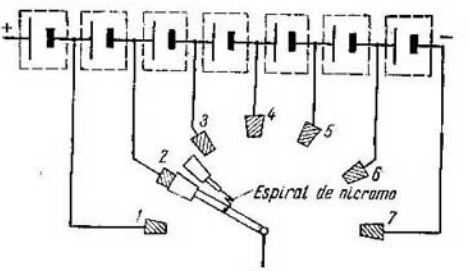


Fig. 422. Conmutador de elemento

El instrumento para realizar la variación del número de elementos de la batería en acción se denomina c o n m u t a d o r d e e l e m e n t o s.

En la fig. 422 está representado el esquema de conexión del conmutador de un elemento. Al conectarse, la manivela del conmutador no debe abrir el circuito de corriente continua. Para este fin, ésta se podría hacer más ancha que la distancia entre los contactos. Pero esto llevaría al cortocircuito del acumulador al pasar la manivela de un contacto a otro. Por eso, el extremo de la manivela se hace con dos escobillas metálicas, desplazadas a una distancia elegida de tal modo que en el momento de separarse una escobilla del contacto, la otra se ponga sobre el contacto vecino.

Ambas escobillas están unidas entre sí con una espiral de nicromo o niquelina. La resistencia de la espiral se escoge de modo que en el momento de cerrar el acumulador, en el circuito no pase una corriente demasiado grande.

§ 209. Consumidores de baterías de acumuladores

En las centrales y subestaciones eléctricas existen los siguientes tipos de consumidores de corriente continua:

1) consumidores constantes: lámparas indicadoras y de control en los cuadros de mando, algunos relés de protección y de dispositivos automáticos, etc.;

2) consumidor temporal: surge en caso de interrumpirse la alimentación de la subestación con corriente alterna trifásica; se compone de lámparas de alumbrado de emergencia y de motores de corriente continua;

3) consumidor de corta duración: mecanismos de conexión de los mandos eléctricos de los interruptores, una parte de los relés de protección y de dispositivos automáticos.

La tensión nominal para los receptores de energía de la red de corriente continua es de 12, 24, 48, 110 y 220 V. Para subestaciones pequeñas con interruptores de accionamiento a mano y de resorte se emplea una tensión de 24 ó 48 V. En las centrales eléctricas y grandes subestaciones para necesidades propias se emplea corriente continua de 110 ó 220 V.

§ 210. Dispositivos de carga

Para la carga completa y adicional de baterías de acumuladores, así como para satisfacer, al mismo tiempo, sus propias necesidades con corriente continua, se emplean grupos convertidores, rectificadores de vapor de mercurio y de selenio.

El grupo convertidor para cargar se compone de un motor asincrónico de corriente trifásica, que se alimenta de su propia red eléctrica y está asentado en el mismo eje del generador de corriente continua con excitación en derivación.

Por medio de un reóstato regulador en el circuito de excitación, el generador debe poder variar la tensión en amplios límites: para cargar acumuladores de plomo, de 230 a 320 V (para baterías de 220 V) o de 115 a 160 V (para baterías de 110 V); para cargar acumuladores de hierro-níquel de 230 a 440 V o de 115 a 220 V respectivamente.

Los rectificadores de vapor de mercurio de ampolla de vidrio que se utilizan en calidad de dispositivos de carga tienen las siguientes ventajas en comparación con los grupos convertidores: carencia de partes móviles, funcionamiento silencioso, seguridad en el servicio, rendimiento más alto. Al mismo tiempo, los rectificadores de vapor de mercurio tienen varios inconvenientes: no pueden soportar fuertes empujes de carga, la ampolla de vidrio sirve poco tiempo (2.000 horas); por lo tanto, los rectificadores de vapor de mercurio se utilizan rara vez para la carga de baterías de acumuladores.

El rectificador de selenio, en comparación con los otros dispositivos rectificadores de baja potencia, ofrece ventajas que consisten en lo siguiente: gran plazo de servicio (hasta 25.000 horas), seguridad en el trabajo, sencillez en el manejo, alto rendimiento (80—85%),

pequeñas dimensiones y poco peso, capacidad considerable de soportar sobrecargas, carencia de partes frágiles y de rápido desgaste, no es afectado por sacudidas.

§ 211. Regímenes de trabajo de baterías de acumuladores

Se emplean dos regímenes de trabajo de las baterías de acumuladores: carga-descarga y carga adicional constante.

En el régimen de carga-descarga, después de cargar una batería de acumuladores, el dispositivo de carga se desconecta y la batería alimenta una carga constante (lámparas indicadoras, instrumentos de mando); se usa periódicamente para la carga de corta duración (mandos electromagnéticos de interruptores) y la carga de emergencia. La batería descargada hasta determinado potencial se conecta de nuevo al dispositivo de carga, el cual, al cargar la batería, alimenta al mismo tiempo un consumidor.

Para la batería que sirve de carga-descarga, una vez cada tres meses se realiza una carga de equilibrio (recarga).

El régimen de carga adicional constante consiste en lo siguiente. La batería se va cargando ininterrumpidamente de un dispositivo, por eso se encuentra en cualquier momento en estado de carga completa. Las sobrecargas que surgen en la red de corriente continua (por ejemplo, durante el trabajo de los accionamientos electromagnéticos de los interruptores de alto voltaje o de los interruptores automáticos de acción rápida) son percibidas por la batería de acumuladores.

Una vez al mes, la batería que trabaja en el régimen de carga adicional constante debe ser cargada de un dispositivo de carga.

Comparando estos dos regímenes de trabajo, se puede indicar las siguientes ventajas del servicio con carga adicional constante. El desgaste de las placas en la batería que trabaja con este régimen adicional es considerablemente menor que en la que trabaja en el de carga-descarga. La batería de régimen con carga adicional constante siempre está dispuesta para el trabajo, lo que no se puede decir de la que trabaja en régimen de carga-descarga. Puede ocurrir, que de una batería descargada, preparada para ser cargada, se necesite de repente una potencia que la batería no es capaz de entregar. Por eso, las baterías de acumuladores trabajan preferentemente en el régimen de carga adicional constante.

Para hacer uso del régimen de carga-descarga se emplea el esquema de batería de acumuladores con conmutador de dos elementos (fig. 423). En calidad de dispositivo de carga se utiliza aquí un grupo convertidor. El generador está conectado a los conductores a través de cortacircuitos, dispositivo automático de corriente máxima con relé de corriente inversa, amperímetro y conmutador *Conm* para dos posiciones.

El dispositivo de máxima protege al generador contra sobrecargas.

El relé de corriente inversa desconecta el generador, si su f. e. m. llega a ser menor que la tensión en las barras de la batería. Esto puede ocurrir al disminuir la velocidad de rotación del generador, al desaparecer la tensión de corriente alterna que alimenta el motor o por otras causas. Si no desconectamos en este momento el generador, éste, pasando a trabajar como motor, se convertirá en consumidor de la batería.

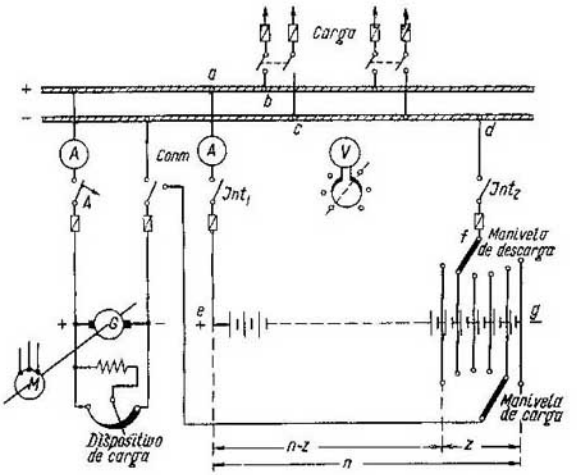


Fig. 423. Esquema de un dispositivo de acumuladores con conmutador de dos elementos

El conmutador tiene dos manivelas, una de las cuales está destinada para la carga, y otra, para la descarga. Ambas manivelas se asientan sobre un eje y pueden girar independientemente una de otra.

El número total de acumuladores que se conectan en una batería debe ser tal, que inclusive los elementos descargados hasta la tensión mínima u_{desc} deben asegurar en las barras de la batería la tensión nominal U_b (115 ó 230 V).

Anteriormente fue indicado que la tensión mínima, por debajo de cuyo valor no se puede descargar el acumulador, es para los de plomo de 1,75 a 1,8 V, y para los alcalinos, de 0,9 a 1 V.

El número total de acumuladores n en la batería se determina de la relación:

$$n = \frac{U_b}{u_{desc}} .$$

Por ejemplo, si $U_b = 115$ y $u_{desc} = 1{,}8$ V, el número de acumuladores debe ser:

$$n = \frac{115}{1{,}8} = 64.$$

Generalmente se toman 66 acumuladores.

Según el esquema representado en la fig. 423 se pueden realizar las siguientes formas de trabajo:

1) una batería de acumuladores abastece de corriente al consumidor;

2) un dispositivo para carga abastece al consumidor;

3) el dispositivo para carga trabaja en paralelo con la batería de acumuladores; ambas abastecen al consumidor;

4) el dispositivo carga la batería, abasteciendo al mismo tiempo al consumidor.

Estudiemos cada una de las formas enumeradas de trabajo de la instalación de acumuladores.

Descarga de la batería. El dispositivo de carga no funciona. El dispositivo automático *A* (fig. 423) y el conmutador *Conm* están desconectados. La manivela de descarga se pone en la posición extrema izquierda. Están conectados los interruptores de cuchilla Int_1 e Int_2. A medida que se vaya descargando la batería, la manivela se desplaza a la derecha para mantener invariable la tensión en las barras. De este modo se introducen en el servicio nuevos acumuladores.

Servicio de un dispositivo de carga para la red. Está conectado el dispositivo automático *A*, el conmutador *Conm* está en la posición izquierda. Los interruptores Int_1 e Int_2 están desconectados.

Servicio en paralelo del generador y de la batería para la red. El dispositivo de carga funciona. Está conectado el dispositivo automático *A*. El conmutador *Conm* está en la posición izquierda. Los interruptores Int_1 e Int_2 están conectados.

Servicio del dispositivo de carga para cargar la batería y para la red. Si el consumo de la red es insignificante, el dispositivo puede entregar la corriente a la red y al mismo tiempo cargar la batería de acumuladores. Pero al final de la carga el generador dará una tensión mayor que la habitualmente necesaria para la red. Si intercalamos en el circuito un reóstato, entonces, a cuenta de la caída de potencial en éste, se puede disminuir la tensión. Pero esto no es ventajoso desde el punto de vista económico. El empleo en el esquema de un conmutador de dos elementos resuelve el problema del servicio simultáneo del generador para la red y para la carga. El conmutador hace posible utilizar la diferencia entre la tensión del generador y la de la red para cargar un grupo de acumuladores conectados al conmutador.

El número de acumuladores unidos al conmutador z se puede determinar partiendo de las siguientes consideraciones. El número de acumuladores que trabajan permanentemente en la batería es igual a $n-z$. Cuando el generador es usado para la carga y la red, este grupo de acumuladores se intercala en paralelo a las barras de la instalación. Por eso, la tensión en las barras U_b, al final de la carga debe ser igual a la que corresponde al grupo de acumuladores que trabajan permanentemente.

El número de acumuladores conectados al conmutador se determina por la expresión $z = n - \frac{U_b}{u_{car}}$.

Por ejemplo, si $U_b = 115$ V, $n = 64$ y $u_{car} = 2{,}7$ V,

$$z = 64 - \frac{115}{2{,}7} = 21 \text{ elementos.}$$

En este caso se toman generalmente 22 elementos, lo que constituye la tercera parte de todos los acumuladores de la batería.

Para el trabajo del generador, para la carga y la red, se emplea un motor asincrónico y, regulando la excitación del generador, se establece en las barras de la batería la tensión nominal. Se conecta el dispositivo automático A, el conmutador *Conm* se pone en la posición derecha, se cierran los interruptores Int_1 e Int_2. La manivela de carga del conmutador se coloca en la posición extrema derecha y la de descarga un poco más a la izquierda con relación a la de carga.

La corriente del generador I está compuesta de dos corrientes: la de consumo I_c y la de carga de la batería I_{car}. La corriente del generador desde el punto a se bifurca: desde el punto b se dirige a la red y a través de los puntos c y d viene a la manivela de descarga (punto f). La corriente de carga I_{car} va desde el punto a a través de la batería al punto f. Entre los puntos f y g, por los acumuladores conectados entre las dos manivelas del conmutador, pasa la corriente de carga y la de consumo, es decir, la corriente total del generador. Para que los acumuladores, conectados al conmutador, no sufran sobrecargas, se eligen para mayor corriente de carga. Durante la carga las manivelas de carga y de descarga se desplazan a la izquierda.

En la fig. 424 se da el esquema de una batería de acumuladores que normalmente presta servicio con carga adicional constante. El esquema admite también la posibilidad del servicio de la batería con carga-descarga. En este caso funciona constantemente un dispositivo de carga adicional de baja potencia. El dispositivo de carga se conecta sólo cuando la batería trabaja con carga-descarga. El dispositivo de carga adicional constituye una reserva del de carga.

Las baterías de acumuladores de 24-48 V de baja potencia están formadas por dos grupos que se cargan y descargan alternativamente. En la fig. 425 se muestra el esquema de una instalación con una batería de acumuladores de baja potencia.

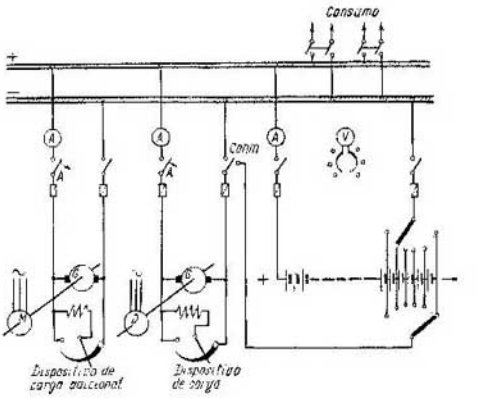


Fig. 424. Esquema de una batería de acumuladores que presta servicio con carga adicional constante

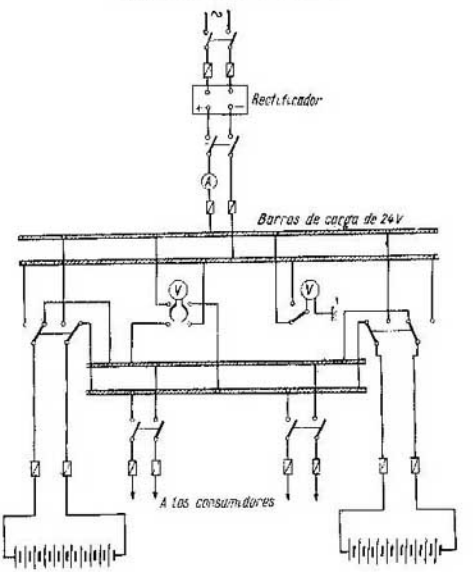


Fig. 425. Esquema de una instalación con batería de acumuladores de baja potencia

§ 212. Local para baterías de acumuladores

Las baterías de acumuladores se instalan en un local especial, en el sótano o piso principal de la central o subestación. El local ha de estar seco, no debe someterse a variaciones bruscas de temperatura, sacudidas y vibraciones. La entrada en el local se hace por un cancel. En las paredes se cuelgan rótulos preventivos: «Local para acumuladores», «Peligro de incendio», «No entrar con fuego», «No fumar».

La temperatura del local al nivel de la disposición de los acumuladores no debe ser menor de 10°C.

Las paredes y el techo, las puertas y los marcos de las ventanas, las cajas de ventilación, estructuras metálicas y otras partes del local periódicamente deben pintarse con pinturas a prueba de ácido (si se instalan acumuladores de plomo).

Para el tendido de alumbrado en los locales con acumuladores se utilizan cables CPГ y BPГ. La instalación del alumbrado ha de ser a prueba de explosión. Los interruptores, enchufes y cortacircuitos se instalan fuera del local para acumuladores.

El local para acumuladores debe tener una ventilación de tiro forzado.

En invierno es preferible calentar el aire frío que entra en el local mediante un calentador.

El piso del local para acumuladores se hace de asfalto o de mosaico.

Las vasijas de los acumuladores se colocan sobre estantes de madera, que se adjuntan a los acumuladores por la fábrica suministradora. Los acumuladores se colocan sobre los estantes en una o dos filas verticales (pisos). Para la aislación entre los estantes y el suelo se ponen placas de vidrio.

Las vasijas de vidrio de los acumuladores se colocan sobre aisladores de porcelana que se apoyan en los estantes.

El tendido del local para acumuladores se hace con cable desnudo de cobre sobre aisladores TΦ. La conexión del local con el conmutador de elementos, instalado en el cuadro de mando, se realiza por medio de un tablero dispuesto en la pared del local. En el local para acumuladores hay un lugar especial donde se guardan las botellas con ácido sulfúrico y agua destilada.

Preguntas de control

1. ¿Cuáles son las características principales de los acumuladores?
2. ¿Para qué sirven y cuál es la estructura de los conmutadores de elementos?
3. Enumérense los consumidores de las baterías de acumuladores.
4. ¿Qué dispositivos de carga se emplean para cargar las baterías de acumuladores?
5. ¿Qué regímenes de trabajo de las baterías de acumuladores hay y en qué se caracterizan?
6. ¿A qué requisitos debe responder un local para baterías de acumuladores?

XVII

TECNICA DE SEGURIDAD EN LAS INSTALACIONES ELECTRICAS

§ 213. Reglas generales de la técnica de seguridad

El trabajo en las instalaciones eléctricas estará absolutamente exento de peligro, si el personal observa con exactitud las reglas de seguridad y del mantenimiento técnico. Con este fin, para el servicio en las instalaciones eléctricas, se admiten personas que conocen las reglas de seguridad y han recibido certificados de capacitación.

Anualmente (o una vez cada seis meses) el personal que sirve en las instalaciones eléctricas pasa un examen de conocimientos de las reglas de seguridad. Todos los trabajos con alta tensión se realizan de acuerdo con las órdenes de formas establecidas por dos personas como mínimo y utilizando obligatoriamente los medios necesarios de protección.

Los principales medios de protección son los dispositivos cuyo aislamiento soporta con eficacia la tensión de servicio de la instalación, y con los cuales se admite tocar las partes conductoras de corriente que tengan tensión.

Entre los principales medios aislantes de protección en las instalaciones de cualquier tensión, se incluyen las barras aislantes para conmutaciones operativas, para realizar mediciones, para conectar a tierra y otros fines, así como tenazas aislantes para cortacircuitos, y, en las instalaciones de baja tensión, guantes y manoplas dieléctricas y herramientas de electricista con mangos aislantes.

Los medios suplementarios de protección son aquellos dispositivos que por sí solos no pueden proteger contra las lesiones provocadas por la corriente y sólo sirven para reforzar la acción de los principales medios de protección, así como para proteger contra las tensiones de contacto y de paso, y de quemaduras por el arco eléctrico. Entre los medios aislantes suplementarios de protección en las instalaciones de alta tensión se incluyen: guantes, manoplas y botas dieléctricas, alfombras de goma y soportes aislantes. Durante todas las operaciones con alta tensión es necesario usar los medios principales de protección junto con los suplementarios. Tanto los medios de protección en uso, como los de repuesto deben ser numerados y en plazos determinados debe ser verificado su estado.

Las instalaciones de baja tensión comprenden aquellas instalaciones en las cuales la tensión entre cualquier conductor y la tierra no supera 250 V. Todas las demás instalaciones se consideran como de alta tensión.

En las instalaciones de baja tensión, todas las partes conductoras de corriente deben estar protegidas contra un contacto accidental con ellas. Así, por ejemplo, las cuchillas de los interruptores y los contactos de los reóstatos deben tener dispositivos protectores.

Durante el trabajo en locales húmedos, así como sobre objetos bien conectados a tierra (calderas, puentes), es necesario emplear transformadores reductores (12 V y 24 V).

Todos los objetos metálicos que se hallan cerca de las partes conductoras de corriente y que pueden tener contacto con éstas deben estar conectados a tierra.

Los trabajos de reparación y de montaje se deben realizar cuando el equipo está desconectado. Pero, si la instalación no puede ser desconectada por cualquier motivo, entonces es necesario observar las reglas de seguridad, utilizando los medios de protección (alfombras aislantes, chanclos de goma, herramientas con mangos aislantes, guantes de goma, dispositivos para conectar a tierra y cerrar en cortocircuito, barras y gafas protectoras).

En lugares correspondientes deben ser colocados carteles metálicos preventivos con una calavera y rótulo: «No tocar, peligro», «Cuidado, alta tensión, peligro» o con otros rótulos semejantes. Los carteles tienen que ser bastante grandes, con letras grandes y claras, y escritas con pintura indeleble. La dimensión mínima de los carteles es de 20 × 10 cm.

Durante los trabajos con alta tensión deben ser observadas las siguientes medidas de precaución:

a) los trabajos deben realizarse solamente por varios obreros (por lo menos dos) para que uno pueda prestarle ayuda al otro en caso de accidente;

b) los obreros deben estar bien aislados de la tierra;

c) durante los trabajos, los obreros no deben tocar a las personas que no están aisladas, ni tampoco las partes metálicas, a saber: máquinas, tubos, etc;

d) antes de comenzar los trabajos, todos los medios de protección deben ser comprobados minuciosamente por los propios obreros.

Se prohíbe categóricamente comenzar el trabajo en las instalaciones de alta tensión (subestaciones, locales para transformadores, sus partes, cables, etc.) antes de recibir la indicación verbal o en forma escrita del responsable de los trabajos y el aviso de que la tensión está desconectada y se puede iniciar el trabajo.

Antes de empezar el trabajo en las instalaciones y equipos de alta tensión, es necesario, por medio de instrumentos correspondientes, convencerse de que no hay tensión en la parte donde se ha de realizar el trabajo. Después hay que descargar las barras colectoras,

los cables de los transformadores, comprobarlos al cortocircuito, cerrarlos y conectar a tierra.

Antes de comenzar los trabajos, es necesario comprobar la seguridad y solidez de las escaleras, escaleras de mano, andamios, tablas, cunas, cuerdas.

Anteriormente fueron enumeradas algunas reglas de seguridad que es necesario observar al realizar trabajos de montaje eléctrico, para montar y equipar las instalaciones de baja y alta tensión.

§ 214. Lesiones provocadas por la corriente eléctrica

Cada obrero y electricista siempre debe tener presente el peligro que ofrece la corriente eléctrica.

Las lesiones que provoca la corriente eléctrica en las personas pueden ser debidas a: 1) contacto con las partes de la instalación que se encuentran bajo tensión en condiciones normales y 2) contacto con las partes de la instalación que en condiciones normales no están bajo tensión, pero que, por casualidad, pueden encontrarse bajo ésta, debido al deterioro del aislamiento (por ejemplo, camisas de máquinas y aparatos).

El hombre afectado por la corriente eléctrica pierde el conocimiento y, a menudo, no da señales de vida (no respira, el corazón no late).

En los casos leves, la pérdida de conocimiento dura varios segundos y el accidentado se recobra sin ayuda ajena. En los casos graves, el conocimiento no vuelve pasados varios segundos y, entonces, es necesaria una asistencia urgente, enérgica y hábil, de lo contrario el accidentado puede morir. Toda demora y preparativos prolongados llevan a la muerte del lesionado.

La muerte por la acción de la corriente eléctrica es a menudo aparente; solamente un médico puede decidir si son inútiles los esfuerzos ulteriores para reanimar al accidentado y constatar su muerte.

Por consiguiente, al afectado por la corriente eléctrica, es necesario librarlo rápidamente del contacto con partes conductoras de corriente y, a pesar del cuadro de muerte aparente, que se confirma por los síntomas primarios, inmediatamente (segundos de tardanza pueden resultar fatales para el accidentado) se debe acudir a la respiración artificial, continuando hasta la reanimación o hasta la aparición de síntomas indiscutibles de muerte (llamados secundarios) a los cuales pertenecen, en primer lugar, las manchas cadavéricas, que aparecen solamente varias horas después de la muerte.

La causa principal de la muerte aparente es la interrupción de la respiración. Por eso, la vida del hombre afectado por la corriente eléctrica dependerá de la rapidez con la cual se le restituya la respiración.

La medida principal para reanimar a un muerto aparente es la respiración artificial, que consiste en la imitación más perfecta de la aspiración y espiración natural.

§ 215. Reglas para prestar los primeros auxilios a los accidentados por la corriente eléctrica

La condición principal del éxito en los primeros auxilios es la rapidez en liberar al accidentado de la corriente y de prestarle correctamente los primeros auxilios.

Liberación del accidentado de la corriente.

El primer acto debe ser la desconexión rápida de la parte de la instalación que toca al accidentado.

Si el accidentado está en peligro de caer de una altura, es necesario prevenirlo o evitar el peligro de su caída.

Si no es posible desconectar rápidamente la instalación, hay que separar al accidentado de las partes conductoras de corriente.

A baja tensión. Para separar al accidentado de las partes conductoras de corriente o apartar el cable del accidentado, hay que utilizar un palo, tabla, cuerda, tela seca u otro aislante seco. En estos casos no se pueden usar objetos metálicos o húmedos.

Para separar al accidentado de las partes conductoras de corriente se puede incluso tirar de su vestido, si éste es seco y no está pegado al cuerpo, por ejemplo, de los faldones, sin tocar los objetos metálicos circundantes y las partes descubiertas del cuerpo. Se permite tirar al accidentado de los pies sólo en el caso de una buena aislación de las manos.

Para aislarse de la tierra y del cuerpo del accidentado, la persona que presta ayuda puede ponerse chanclos de goma o colocarse sobre una tabla o alfombra secas que no dejen pasar la corriente, ponerse guantes de goma o envolver las manos en tela encauchatada o seca.

Cuando la corriente pasa a través del hombre a la tierra, se puede interrumpir la corriente, separando al accidentado de la tierra, observando las reglas de seguridad mencionadas más arriba.

Cuando hace falta cortar los cables (cada uno por separado), esto debe hacerse con un hacha con mango de madera seca o con una herramienta cualquiera con aislación, tomando medidas para aislarse de la tierra.

A alta tensión. Hay que ponerse las botas, los guantes y actuar con barra o tenazas para la tensión correspondiente.

En las líneas aéreas. Si no hay otro remedio para liberar rápidamente y sin riesgo al accidentado, es necesario cortocircuitar los cables de la línea.

Primeros auxilios

a) Si el accidentado no ha perdido el conocimiento, pero sufrió desmayo o se encontró durante largo tiempo bajo corriente, hay que asegurarle reposo absoluto hasta la llegada del médico y su observación ulterior durante 2 ó 3 horas, pero, si es imposible llamar urgen-

temente al médico, hay que llevar sin tardanza al accidentado al hospital.

b) Si el accidentado está sin conocimiento pero ha conservado la respiración, hay que acostarle cómodamente sobre una tarima blanda. Aflojar el cinturón y desabrochar la ropa, asegurar la afluencia de aire fresco, alejar a las personas innecesarias. Darle a oler un algodón impregnado con solución acuosa de amoníaco, rociarle con agua (no de la boca), frotar y calentar el cuerpo con trapos de lana limpios, después abrigar bien al accidentado. Llamar urgentemente al médico.

c) Si el accidentado respira mal, raramente y con espasmos, como un moribundo, hay que darle respiración artificial.



Fig. 426. Método para abrir la boca a un accidentado

d) Si la boca está fuertemente cerrada, hay que abrirla, para lo cual se hace bajar la mandíbula inferior. Para elevar y hacer bajar la mandíbula, es necesario apoyar los dedos pulgares en su borde y bajarla de modo que los dientes inferiores se coloquen delante de los superiores (fig. 426).

Si no se logra abrir la boca de este modo, hay que interponer, con cuidado para no romper los dientes, entre los molares posteriores, junto al ángulo de la boca, una tablilla, lámina metálica, mango de una cuchara, etc. y separar los dientes.

e) Si no hay síntomas de vida (respiración, palpitación del corazón, pulso) eso no significa todavía que el accidentado está muerto. A menudo la muerte es aparente. Sólo un médico puede constatar la muerte de un accidentado.

Para reanimar a un muerto aparente, cada segundo es precioso. Por eso hay que acudir a los primeros auxilios, utilizando las medidas mencionadas y darle respiración artificial, inmediata e ininterrumpidamente en el lugar del accidente. Transportar a otro lugar al accidentado se puede sólo en casos de que éste o la persona que le presta auxilio se encuentren bajo peligro.

Se debe dar respiración artificial hasta obtener un resultado positivo (reanimación) o hasta la aparición de síntomas evidentes de muerte real (aparición de equimosis o rigidez cadavérica).

Cuando el accidentado comienza a respirar sin ayuda es nocivo continuar la respiración artificial, pero, si la respiración comienza

de nuevo a debilitarse o interrumpirse, hay que renovar inmediatamente la respiración artificial. Después de recobrar el conocimiento, se debe acostar, cubrir, abrigar y dar de beber líquido caliente al accidentado. Darle 15-20 gotas de tintura de valeriana.

Cada accidentado, inclusive leve, debe ser llevado al médico lo más rápido posible para su observación ulterior.

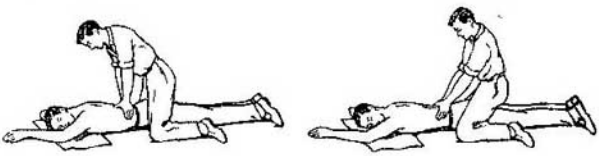


Fig. 427. Primer método de respiración artificial (la asistencia es prestada por una persona)

Primeros auxilios en caso de quemaduras.

1. Vendar las quemaduras ligeras con vendas asépticas, tal como se hace en caso de heridas.

2. En caso de quemaduras graves y extensas no se debe desvestir al accidentado, tampoco quitar las partes del vestido que se hayan

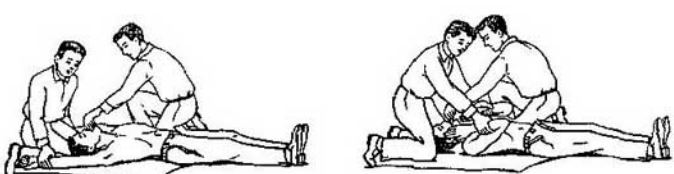


Fig. 428. Segundo método de respiración artificial (la asistencia es prestada por varias personas)

pegado; hay que hacer sobre la camilla un cobertizo de lona, ropa de trabajo, etc., que no toque el cuerpo.

Calentar y dar de beber al accidentado y proporcionarle asistencia médica.

Métodos para dar la respiración artificial

Primer método. La asistencia es prestada por una persona (fig. 427).

Colocar al accidentado boca abajo, poner su cabeza sobre uno de los antebrazos con la palma de la mano hacia abajo y extendiendo algo debajo. Extender el otro brazo hacia adelante. Sacar su lengua, pero sin sujetarla después. Ponerse de rodillas encima del accidentado, a horcajadas, de frente a su cabeza, de modo que las caderas del accidentado se encuentren entre las rodillas del que presta el auxilio.

Poner las palmas de las manos en la espalda del accidentado, sobre las costillas inferiores, cogiéndolas por los costados con los dedos. Contando «uno», «dos», «tres» inclinar gradualmente el cuerpo hacia adelante para presionar con el peso del cuerpo sobre las manos extendidas y, de este modo, apretar las costillas inferiores del accidentado (espiración). Sin quitar las manos de la espalda del accidentado, volver a la posición original (aspiración).

Después de contar «cuatro», «cinco», «seis», de nuevo, paulatinamente y sin apresurarse, hacer presión sobre las manos extendidas con el peso del cuerpo, contando «uno», «dos», «tres», etc. Hay que repetir las presiones uniformemente, sin apurarse, de 12 a 15 veces por minuto.

Si ha habido fractura de costillas o quemaduras en la espalda, este procedimiento no se aplica.

Segundo método (fig. 428). Si hay quien ayude: acostar al accidentado boca arriba extendiendo alguna cosa de abrigo debajo del cuerpo y un lío de ropa bajo los amóplatos para que la cabeza se incline (abata) hacia atrás, abrir y limpiar la boca, sacar los dientes postizos. Sacar y sujetar la lengua tirando de ella levemente hacia la barbilla. Ponerse de rodillas por encima de la cabeza del accidentado, tomarle por los antebrazos junto al codo y contando «uno», «dos», «tres», elevar las manos del accidentado y llevarlas detrás de su cabeza (aspiración).

Contando «cuatro», «cinco», «seis» apretar ligeramente los brazos contra los costados (espiración), etc.

Si la respiración artificial se hace correctamente se produce un sonido (parecido a un gemido) al pasar el aire por la tráquea del accidentado, cuando se comprime y dilata el tórax.

Si no hay ningún sonido, eso significa que la lengua impide el paso del aire.

En caso de fractura del brazo o de la clavícula, el segundo método no se aplica.

Si hay otras personas que ayudan, entonces la respiración artificial la realizan dos, de modo concordado y acompasado, tomando cada una de ellas un brazo del accidentado; una tercera tira de la lengua.

En todos los métodos es necesario evitar la compresión excesiva del tórax, ya que se pueden fracturar las costillas, así como expulsar la comida del estómago y taponar las vías respiratorias.

Tampoco se deben hacer movimientos bruscos y fuertes con las manos del accidentado, para evitar fracturas y dislocaciones.

APÉNDICE

1. PRINCIPALES REPRESENTACIONES DE LAS UNIDADES FISICAS

Denominación	Representación	Denominación	Representación
Gramo (masa)	g	Milivatio	mW
Kilogramo (masa)	kg	Microvatio	μW
Miligramo (masa)	mg	Electrón (carga)	e
Gramo (fuerza)	gf	Culombio	C
Kilogramo (fuerza)	kgf	Amperio-segundo	A-seg
Metro	m	Amperio-hora	A-h
Kilómetro	km	Julio	J
Centímetro	cm	Vatio-segundo	W-seg
Decímetro	dm	Vatio-hora	Wh
Milímetro	mm	Hectovatio-hora	hWh
Metro cuadrado	m^2	Kilovatio-hora	kWh
Centímetro cuadrado	cm^2	Voltamperio	VA
Milímetro cuadrado	mm^2	Kilovoltamperio	kVA
Ohmio	Ω	Voltamperio reactivo	VAr
Kiloohmio	kΩ	Kilovoltamperio reactivo	kVAr
Megohmio	MΩ	Faradio	F
Amperio	A	Microfaradio	μF
Kiloamperio	kA	Picofaradio	pF
Miliamperio	mA	Henrio	H
Microamperio	μA	Hertzio	Hz, c/s
Voltio	V	Kilohertzio	kHz, kc/s
Kilovoltio	kV	Megahertzio	MHz, Mc/s
Milivoltio	mV	Weber	Wb
Microvoltio	μV	Maxwell	Mx
Vatio	W	Gausio	Gs
Hectovatio	hW	Oersted	Oe
Kilovatio	kW	Newton	N
Megavatio	MW	Caloría	cal
		Kilocaloría	kcal

2. SÍMBOLOS DE LAS PRINCIPALES MAGNITUDES ELECTRICAS

Denominación	Símbolo
Capacidad eléctrica	C
Inductancia; factor de autoinducción	L
Inducción magnética	B
Cantidad de electricidad, carga eléctrica	Q, q
Coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica, equivalente electroquímico	α
Potencia activa	P
Potencia reactiva	Q
Potencia aparente	S
Potencia instantánea	p
Tensión eléctrica	U, u
Intensidad del campo magnético	H
Intensidad del campo eléctrico	E
Densidad de la corriente	δ
Flujo magnético	Φ
Concatenamiento magnético; flujo magnético total	Ψ
Conductancia eléctrica activa	G
Constante dieléctrica	ε
Permeabilidad magnética relativa	μ
Desfasamiento entre la tensión y corriente, potencial	φ
Fuerza electromotriz	E, e (f. e. m.)
Resistencia eléctrica activa	R
Reactancia	x
Resistencia eléctrica total (impedancia)	z
Resistividad	ρ
Intensidad de la corriente	I, i
Fase inicial	ψ
Frecuencia	f
Frecuencia angular	ω
Número de espiras de un devanado	w
Coeficiente de proporcionalidad	c

3. RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS (algunas son aproximadas)

Capítulo I

1. 1,35N = 137,7 gf
2. 18,15 dinas
3. 9 cm
4. $4{,}5 \cdot 10^3$ V/cm
5. $4 \cdot 10^{-8}$ C
6. 10^6 V
7. 150 J
8. 4 μF
9. 1/300 μF

Capítulo II

1. 16,55 Ω
2. 3,6 Ω
3. 0,1 mm²
4. 10,9 m
5. Hierro
6. 0,25 mm²
7. 1550 Ω
8. 2,2 mm²
9. 50°C
10. 13,06 m
11. 28 V
12. 5,8 Ω
13. 1600 Ω
14. 6 Ω
15. 22,4 V; 9,6 V; 6,4 V
16. 270,4 Ω
17. 0,8 Ω
18. 0,88 Ω
19. 24,5 Ω
20. 12 Ω
21. 5 Ω
22. 7,96 Ω
23. 2,47 Ω
24. 4,5 A
25. 6 Ω
26. 9,25 A; 2,06 A; 3,09 A; 5,76 A; 2,88 A; 1,92 A; 3,84 A
27. 114,4 V
28. 3,81 A; 5,71 A; 7,62 A; 286 A;
29. 35 mm²
30. 226 V
31. 600 Wh
32. 242 Ω
33. 25 A
34. 4,4 kWh
35. 1 rublo 49 cop.
36. 24 mm²; 5,46 kW; 460 W
37. 17,5 mm²
38. 7,73 CV
39. 8,8 kW

Capítulo III

1. 16,9 mg
2. 1976 mg
3. 109,5 min
4. 350 min
5. 0,125 A
6. 1 A; 0,297 A
7. 0,5 A; 4,2 A
8. 2 A; 9,99 V; 20 W

Capítulo IV

1. 520 kcal
2. 378 cal
3. 522 cal; 417,6 cal; 1728 cal; 2160 cal
4. 79,2 kcal
5. 38,9; 25,9; 12,9 cal
6. 14,7 kcal
7. 10 m

Capítulo V

1. 159 A/m
2. 200 A/m
3. $15\ \pi \cdot 10^{-5}$ Wb
4. 5 N
5. $2 \cdot 10^{-4}$ N

Capítulo VI

1. 0,375 V
2. 12 V
3. 1 kV
4. 3 H

Capítulo VII

1. 50 Hz
2. 240 r. p. m.
3. 20 polos
4. 66,3 V
5. 50 V
6. 76 Ω; 30 Ω; 69,7 Ω
7. 62 V
8. 11,5 A
9. 204 W, 240 VA
10. 2,75 Ω; 2,5 Ω; 1,14 Ω; 4400 VA; 0,91; 1825 VAR 45,5 V; 100 V
11. 52,1 A
12. 200; 160; 120; 80; 40 kW
13. 83,5 V; 8,35Ω; 2,5 Ω; 7,96 Ω
14. 1,5 Ω; 2Ω; 2,5 Ω; 160 VA; 96 W; 128 VAR
15. 2400 VA; 1920 W; 1440 VAR; 6 Ω; 4,8 Ω; 3,6 Ω; 96 V; 72 V
16. 8941 W
17. 960 W; 1760 VA; 1472 VAR; 27,5 Ω; 23 Ω; 0,545; 120 V; 184 V
18. 19,2 Ω; 14,4 Ω; 24 Ω;
19. 0,33; 119,5 V; 50 W; 150 W
20. 59,75 V; 18 W; 18 W

Capítulo VIII

1. 127 V; 35,4 A
2. 8,65 A
3. 50 kW; 40 kW; 30 kW; 10 kW
4. 17,75 A
5. 4775 W; 6,2 kVA
6. 3733 W; 11,2 kW
7. 240 lámparas
8. 7,25 A
9. 2,59 kW
10. 323,5 W
11. 276 lámparas

Capítulo IX

1. 17,4; 12, 65 V
2. 0,485 A
3. 0,26 A
4. 94%
5. 6,07 A
6. 534 espiras
7. 4,78 A; 188 A
8. 10,4 A; 2,4 A

Capítulo XIV

1. $\Delta abs = -0{,}1$ A
   $\Delta rel = -0{,}01$
   $\Delta red = -0{,}005$
2. 0,004 Ω
3. 78 A
4. 14 kΩ
5. 5340 Ω
6. $\Delta abs = -0{,}25$ W
   $\Delta rel = -0{,}0042$
7. 2850 V
8. 120 A
9. 420 A
10. 45 kW
11. 142,56 kW
12. 18 kW

SUMARIO

I. Electrostática

§ 1. Moléculas y átomos 5
§ 2. Nociones generales sobre la electricidad y la teoría electrónica 6
§ 3. Sistemas de unidades de medición de las magnitudes eléctricas y magnéticas 14
§ 4. Ley de Coulomb 16
§ 5. Campo eléctrico 17
§ 6. El conductor en el campo eléctrico 24
§ 7. El dieléctrico en el campo eléctrico 26
§ 8. Potencial y diferencia de potencial 27
§ 9. Capacidad eléctrica 30
§ 10. Dieléctricos 36
§ 11. Resistividad (resistencia específica) 37
§ 12. Permitividad (constante dieléctrica) 38
§ 13. Angulo de pérdidas dieléctricas 39
§ 14. Rigidez dieléctrica 39
§ 15. Principales materiales aislantes 40
Problemas 46
Preguntas de control 47

II. Leyes fundamentales de la corriente continua

§ 16. Nociones acerca de la corriente eléctrica 48
§ 17. Circuito eléctrico y sus elementos 49
§ 18. Intensidad y densidad de la corriente 50
§ 19. Resistencia y conductividad de los conductores. Dependencia de la resistencia de los conductores de las condiciones físicas . . . 51
§ 20. Fuerza electromotriz (f. e. m.) de la fuente de corriente. Tensión 56
§ 21. Ley de Ohm 58
§ 22. Conexión de conductores entre sí. Primera ley de Kirchhoff . . 65
§ 23. Trabajo y potencia de la corriente eléctrica 71
§ 24. Cortocircuito 74
§ 25. Segunda ley de Kirchhoff. Aplicación de las leyes de Kirchhoff para calcular los circuitos eléctricos 76
§ 26. Método de superposición 79
§ 27. Método de la tensión del punto de derivación 81
§ 28. Método de las corrientes de circuito 84
§ 29. Conductores metálicos 87
§ 30. Características principales de los materiales conductores de la corriente 88

§ 31. Materiales conductores 90
§ 32. Materiales de alta conductividad 91
§ 33. Metales empleados en la electrotecnia 92
§ 34. Carbón electrotécnico 93
§ 35. Aleaciones de alta resistencia 93
§ 36. Semiconductores 97
Problemas 103
Preguntas de control 105

III. Efectos químicos de la corriente eléctrica y las fuentes químicas de corriente

§ 37. Electrólisis 106
§ 38. Primera ley de Faraday 109
§ 39. Segunda ley de Faraday 110
§ 40. Aplicación técnica de la electrólisis 112
§ 41. Pilas eléctricas 114
§ 42. Acumuladores eléctricos 119
§ 43. Acumuladores de plomo 119
§ 44. Acumuladores alcalinos 122
§ 45. Conexión de los generadores de electricidad 123
Problemas 127
Preguntas de control 128

IV. Efectos térmicos de la corriente eléctrica

§ 46. Calentamiento del conductor por la corriente eléctrica 129
§ 47. Ley de Joule-Lenz 129
§ 48. Temperatura de calentamiento del conductor por la corriente eléctrica 131
§ 49. Lámparas eléctricas de incandescencia 133
§ 50. Arco eléctrico 135
§ 51. Soldadura eléctrica 137
§ 52. Aparatos eléctricos de calefacción 139
§ 53. Relés térmicos 140
§ 54. Fusibles 141
§ 55. Conexión de los conductores 143
§ 56. Termoelectricidad. Pares termoeléctricos 143
Problemas 144
Preguntas de control 145

V. Electromagnetismo

§ 57. Campo magnético alrededor de un conductor rectilíneo con corriente 146
§ 58. Conductor circular con corriente 150
§ 59. Solenoide. Electroimán 151

§ 60. Ley de la corriente total 154
§ 61. Cuerpos ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos . . 157
§ 62. Cuerpos ferromagnéticos en un campo magnético 158
§ 63. Histéresis 159
§ 64. Circuitos magnéticos y su cálculo 161
§ 65. Imanes permanentes 164
§ 66. Conductor con corriente en un campo magnético 165
§ 67. Principio de acción de un motor eléctrico de corriente continua 167
§ 68. Interacción de conductores con corriente 168
§ 69. Materiales magnéticos y no magnéticos 169
Problemas 173
Preguntas de control 174

VI. Inducción electromagnética

§ 70. Obtención de fuerza electromotriz inducida 175
§ 71. Dirección y magnitud de la f.e.m. inducida 177
§ 72. Principio de funcionamiento de un generador de corriente continua 181
§ 73. Ley de Lenz 182
§ 74. Corrientes parásitas 185
§ 75. F.e.m. de autoinducción e inductancia del circuito 188
§ 76. Inducción mutua 193
§ 77. Principio de funcionamiento de un transformador 196
§ 78. Bobina de inducción 197
Problemas 198
Preguntas de control 198

VII. Corriente alterna monofásica

§ 79. Obtención de la corriente alterna 199
§ 80. Nociones y definiciones principales acerca de la corriente alterna 204
§ 81. Magnitudes sinusoidales variables 205
§ 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 210
§ 83. Valor eficaz de la corriente alterna 212
§ 84. Valor medio de la corriente alterna 214
§ 85. Circuito de corriente alterna con resistencia activa 215
§ 86. Circuito de corriente alterna con inductancia 217
§ 87. Efecto pelicular 224
§ 88. Circuito de corriente alterna con capacidad (condensador) . . . 224
§ 89. Conexión en serie de la resistencia activa y la reactancia inductiva (R, x_L) 227
§ 90. Triángulo de tensiones 230
§ 91. Triángulo de impedancia 230
§ 92. Ley de Ohm para un circuito con resistencia activa e inductancia (R, L) 232
§ 93. Conexión en serie de una resistencia activa y una capacidad (R, C) 234

§ 94. Conexión en serie de una resistencia activa, una inductancia y una capacidad (R, L, C) 236
§ 95. Conductancia en un circuito de corriente alterna 239
§ 96. Derivación de un circuito de corriente alterna 240
§ 97. Circuito oscilante 245
§ 98. Triángulo de potencias 248
§ 99. Factor de potencia («coseno fi») 251
§ 100. Necesidad de aumentar el «coseno fi» de los consumidores . . . 253
§ 101. Causas que influyen sobre la magnitud del «coseno fi» del consumidor y medidas que se adoptan para aumentar el «coseno fi» 255
Problemas 258
Preguntas de control 259

VIII. Corriente alterna trifásica

§ 102. Corrientes polifásicas 260
§ 103. Corriente alterna trifásica 260
§ 104. Conexión en estrella 264
§ 105. Conexión en triángulo 271
§ 106. Potencia de la corriente alterna trifásica 276
§ 107. Creación de un campo magnético giratorio mediante la corriente trifásica 278
Problemas 280
Preguntas de control 281

IX. Transformadores

§ 108. Nociones generales sobre los transformadores 282
§ 109. Trabajo en vacío del transformador 286
§ 110. Carga del transformador 289
§ 111. Ensayos sobre el trabajo en vacío y el cortocircuito del transformador 292
§ 112. Papel del transformador en la transmisión de la energía eléctrica a distancia 294
§ 113. Construcción y tipos de transformadores 296
§ 114. Transformadores trifásicos 301
§ 115. Trabajo en paralelo de los transformadores 303
§ 116. Autotransformadores 306
Problemas 311
Preguntas de control 311

X. Motores asincrónicos o de inducción

§ 117. Generalidades 312
§ 118. Principio de funcionamiento del motor asincrónico 313
§ 119. Par de arranque de un motor asincrónico 316
§ 120. Motor asincrónico con rotor de jaula de ardilla 322

§ 121. Motor asincrónico de rotor bobinado 327
§ 122. Propiedades de los motores asincrónicos y su empleo 329
§ 123. Disposición de los devanados del estator y del rotor en los motores asincrónicos 330
§ 124. Motores asincrónicos monofásicos 333
Preguntas de control 334

XI. Máquinas sincrónicas

§ 125. Generadores (alternadores) sincrónicos 335
§ 126. Estructura de los alternadores sincrónicos 336
§ 127. Reacción del inducido del alternador sincrónico 342
§ 128. Características de los alternadores sincrónicos 344
§ 129. Funcionamiento en paralelo de alternadores sincrónicos 347
§ 130. Estructura y funcionamiento de un motor sincrónico 350
§ 131. Propiedades de los electromotores sincrónicos y esfera de suempleo 352
Preguntas de control 353

XII. Máquinas de corriente continua

§ 132. Estructura del generador de corriente continua 354
§ 133. Empleo y estructura del colector en los generadores de corriente continua 358
§ 134. Devanado del inducido 363
§ 135. Magnitud de la f.e.m. inducida en el inducido del generador de corriente continua 369
§ 136. Reacción del inducido. Conmutación. Polos auxiliares (de conmutación) 370
§ 137. Tipos de generadores de corriente continua 375
§ 138. Generador con excitación independiente 376
§ 139. Generador con excitación en derivación 380
§ 140. Generador con excitación en serie 383
§ 141. Generador con excitación compuesta (compound) 384
§ 142. Trabajo en paralelo de los generadores con excitación en derivación 386
§ 143. Funcionamiento de una máquina de corriente continua como motor eléctrico 388
§ 144. Empleo del colector en los motores eléctricos de corriente continua 389
§ 145. Fuerza contraelectromotriz del inducido 390
§ 146. Regulación de la velocidad de rotación de los motores de corriente continua 393
§ 147. Reacción del inducido de motores de corriente continua . . . 394
§ 148. Motor con excitación en derivación 395
§ 149. Motor con excitación en serie 398
§ 150. Motor con excitación compuesta 400
§ 151. Convertidores rotatorios 401
Preguntas de control 405

XIII. Rectificadores

§ 152. Nociones generales sobre rectificadores 406
§ 153. Rectificadores de óxido de cobre 407
§ 154. Rectificadores de selenio 408
§ 155. Rectificador semiconductor de germanio 409
§ 156. Esquema de conexión de rectificadores metálicos 411
§ 157. Kenotrón (válvula rectificadora) 413
§ 158. Rectificadores de vapor de mercurio de ampolla de vidrio . . 417
§ 159. Rectificadores de vapor de mercurio de tanque metálico . . 422
Preguntas de control 425

XIV. Instrumentos eléctricos de medición y técnica de mediciones eléctricas

§ 160. Consideraciones generales sobre instrumentos de medición eléctricos 428
§ 161. Clasificación de instrumentos eléctricos de medición 431
§ 162. Instrumentos magnetoeléctricos de medición 431
§ 163. Instrumentos electromagnéticos de medición 434
§ 164. Instrumentos electrodinámicos de medición 436
§ 165. Instrumentos térmicos de medición 437
§ 166. Instrumentos inductivos de medición 439
§ 167. Instrumentos de sistema termoeléctrico 442
§ 168. Instrumentos de sistema detector 443
§ 169. Instrumentos de sistema de resonancia 444
§ 170. Transformadores de medición 445
§ 171. Transformadores de tensión 447
§ 172. Transformadores de intensidad 452
§ 173. Medición de la intensidad de la corriente en el circuito . . . 456
§ 174. Medición de diferencias de potencial 457
§ 175. Reóstato 458
§ 176. Medición de la potencia eléctrica activa 461
§ 177. Medición de la energía eléctrica activa 468
§ 178. Medición de la energía reactiva 471
§ 179. Medición del factor de potencia 473
§ 180. Medición de resistencias 475
Problemas 482
Preguntas de control 483

XV. Accionamiento eléctrico

§ 181. Nociones generales 484
§ 182. Características de los motores eléctricos 486
§ 183. Régimen de trabajo de los motores eléctricos 486
§ 184. Aislamiento de las máquinas eléctricas 488
§ 185. Diseños de las máquinas eléctricas 488

§ 186. Refrigeración de las máquinas eléctricas 489
§ 187. Clasificación de los motores según la característica mecánica (de velocidad) 489
§ 188. Selección de la potencia de los motores 490
§ 189. Protección de los motores eléctricos 495
§ 190. Protección de los motores eléctricos mediante fusibles 495
§ 191. Protección de los motores eléctricos mediante interruptores automáticos 497
§ 192. Protección de los motores eléctricos mediante relés térmicos . . 498
§ 193. Aparatos de mando de los motores eléctricos 499
§ 194. Interruptores de cuchilla, conmutadores e interruptores de paquete 499
§ 195. Contactores 502
§ 196. Combinadores o controllers 503
§ 197. Botones de mando 505
§ 198. Arrancadores magnéticos 505
§ 199. Arranque de los motores asincrónicos 508
§ 200. Arranque de los motores sincrónicos 513
§ 201. Cambio de la dirección de rotación de los motores eléctricos (reversión) 515
§ 202. Regulación de la velocidad de rotación de los motores eléctricos 517
§ 203. Esquemas especiales de arranque y de regulación de la velocidad de rotación de los motores de corriente continua de gran potencia 520
§ 204. Frenado de los motores eléctricos 522
§ 205. Esquemas de control de los motores eléctricos mediante aparatos electromagnéticos 526
§ 206. Control de los motores eléctricos por medio de combinadores . . 532
Preguntas de control 534

XVI. Baterías de acumuladores

§ 207. Generalidades 535
§ 208. Conmutadores de elementos 539
§ 209. Consumidores de baterías de acumuladores 539
§ 210. Dispositivos de carga 540
§ 211. Regímenes de trabajo de baterías de acumuladores 541
§ 212. Local para baterías de acumuladores 546
Preguntas de control 546

XVII. Técnica de seguridad en las instalaciones eléctricas

§ 213. Reglas generales de la técnica de seguridad 547
§ 214. Lesiones provocadas por la corriente eléctrica 549
§ 215. Reglas para prestar los primeros auxilios a los accidentados por la corriente eléctrica 550