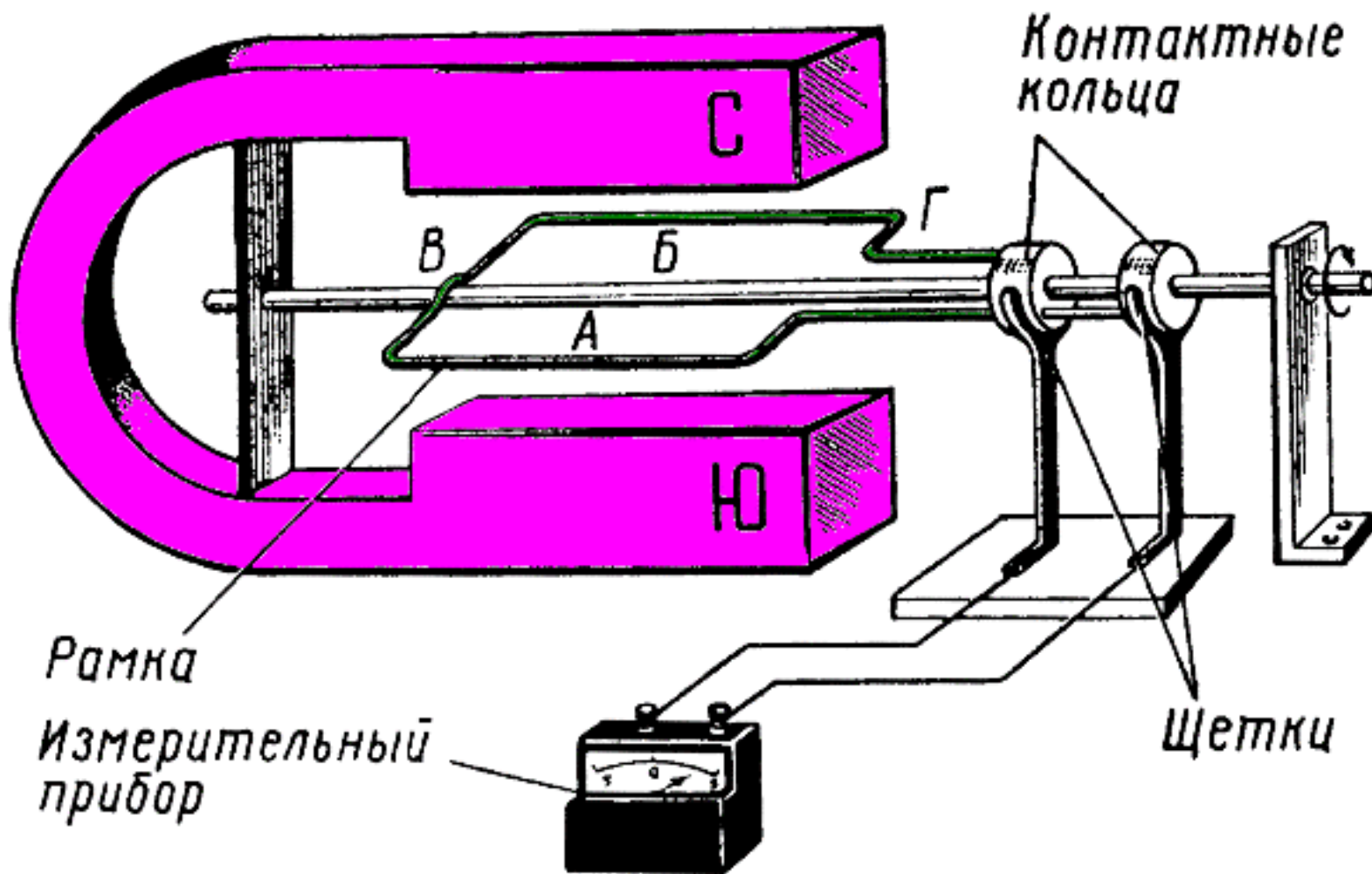


Електрика та МАГНІТИЗМ

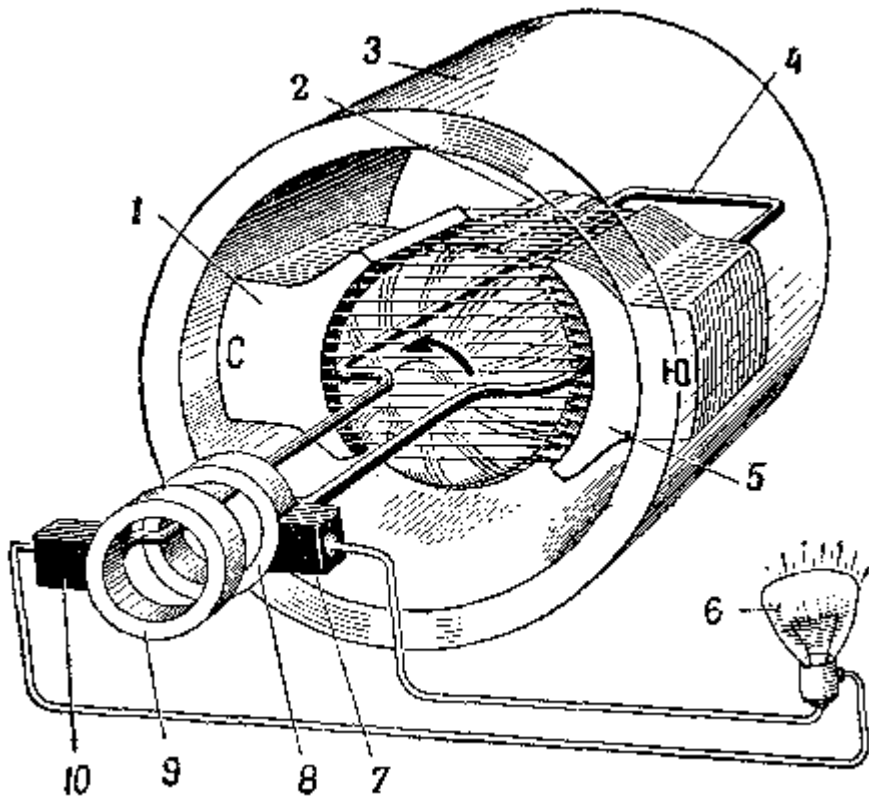
Лекція 11.

Електричні генератори та двигуни. Магнітні кола.
Рівняння неперервності. Рівняння телеграфістів.

Принципова ідея генератора змінного електричного струму



На виході – синусоїда.



Катушки
индуктивности
ротора

Катушки индуктивности
статора

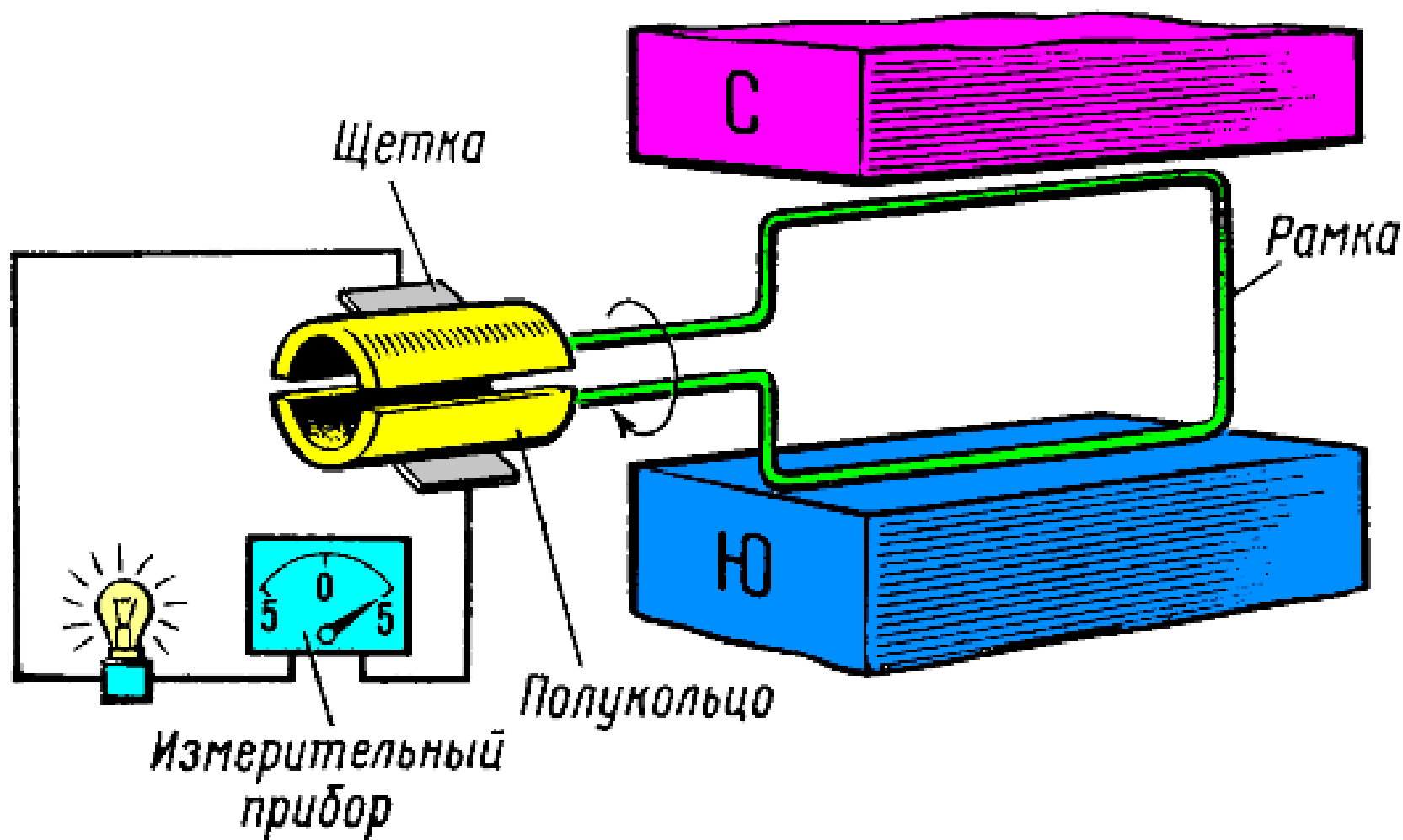
InsideCarElectronics.com

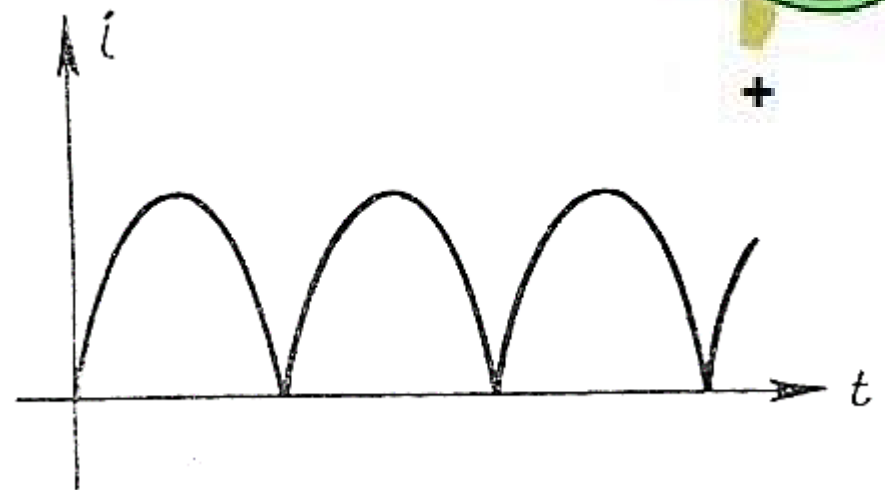
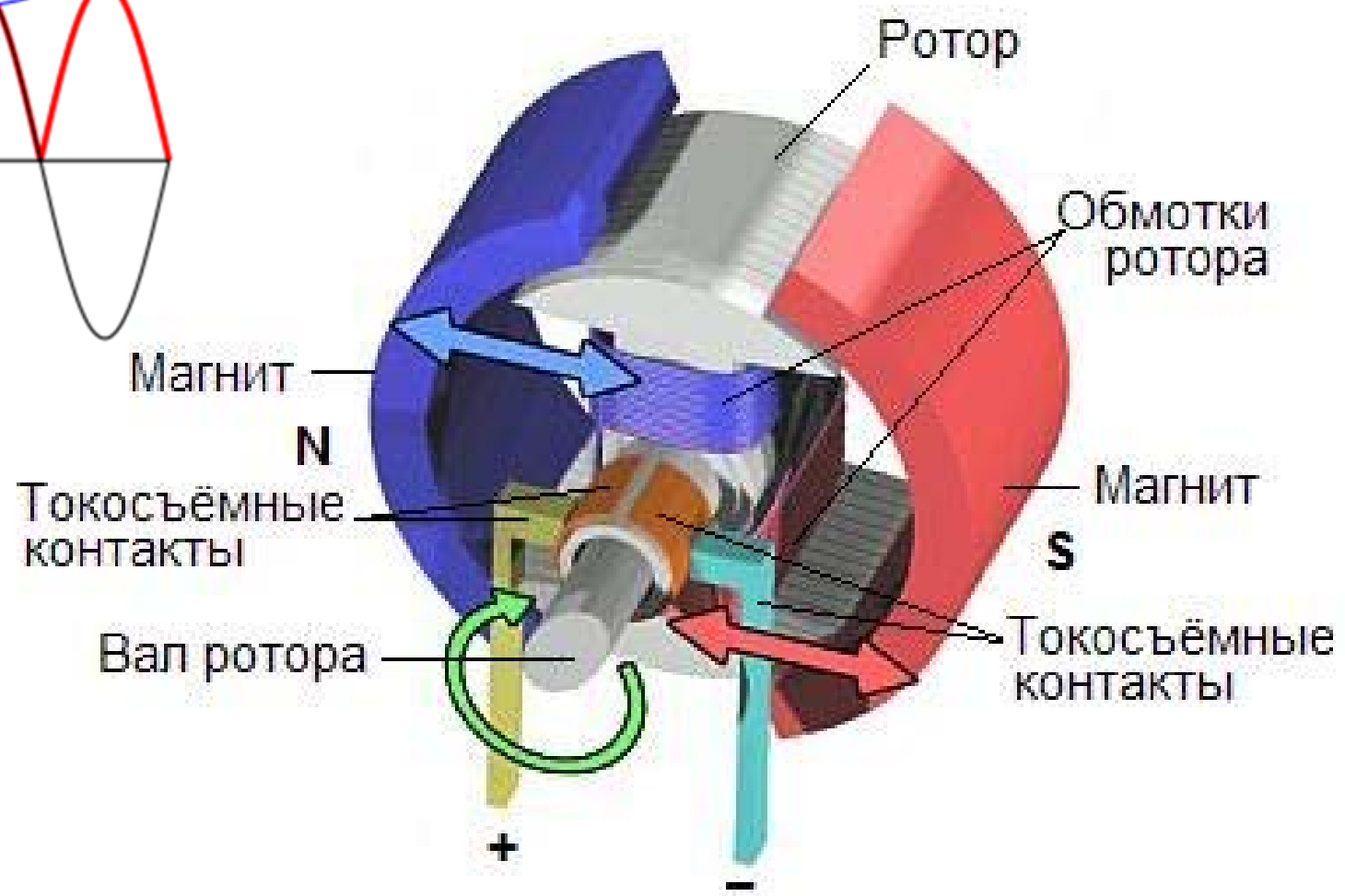
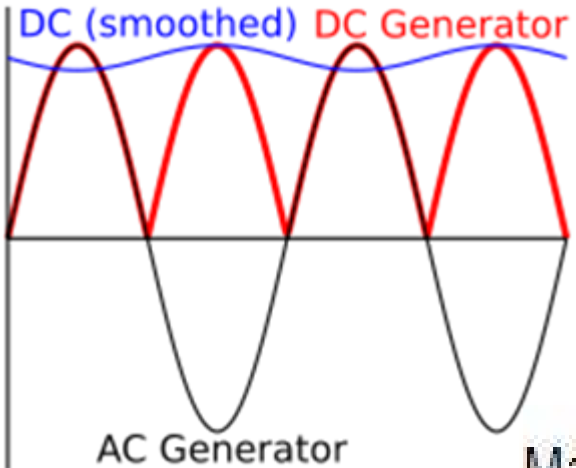
Схема простейшего генератора переменного тока:
1 и 5 - полюсные башмаки; 2 - якорь; 3 - цилиндрический магнит (корпус генератора); 4 - рамка (виток); 6 - лампа накаливания; 7 и 10 - щетки; 8 и 9 - кольца.

Вращаясь, рамка пересекает обеими сторонами магнитные силовые линии, вследствие чего в рамке наводится электродвижущая сила. Эта ЭДС создает ток, так как концы рамки при помощи изолированных одно от другого колец 9 и 8 и скользящих щеток 10 и 7 соединены с внешней цепью - лампой накаливания 6.

Замість постійного магніту ротор та статор можуть бути електромагнітами.

Генератор постійного, точніше пульсуючого струму





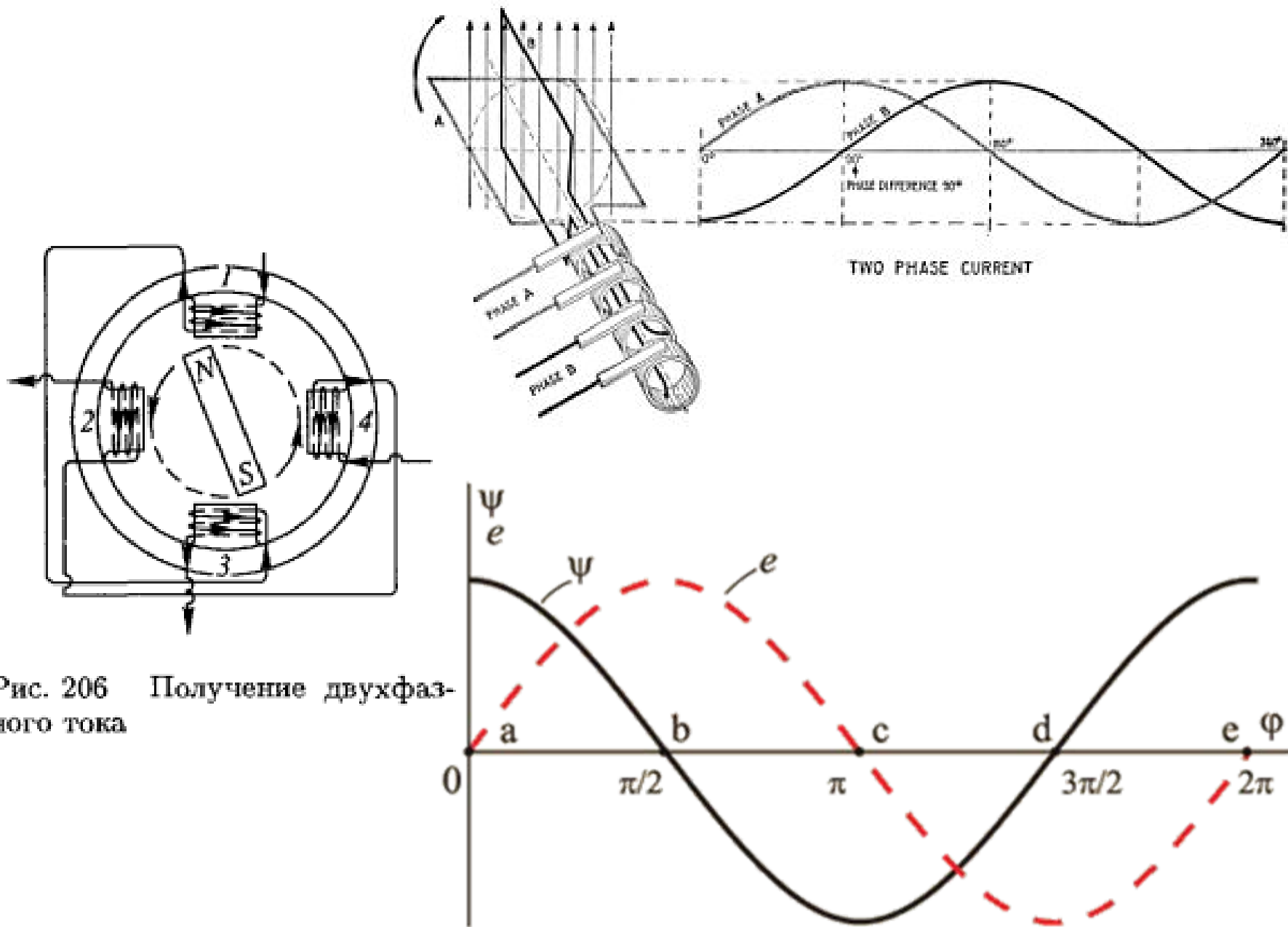
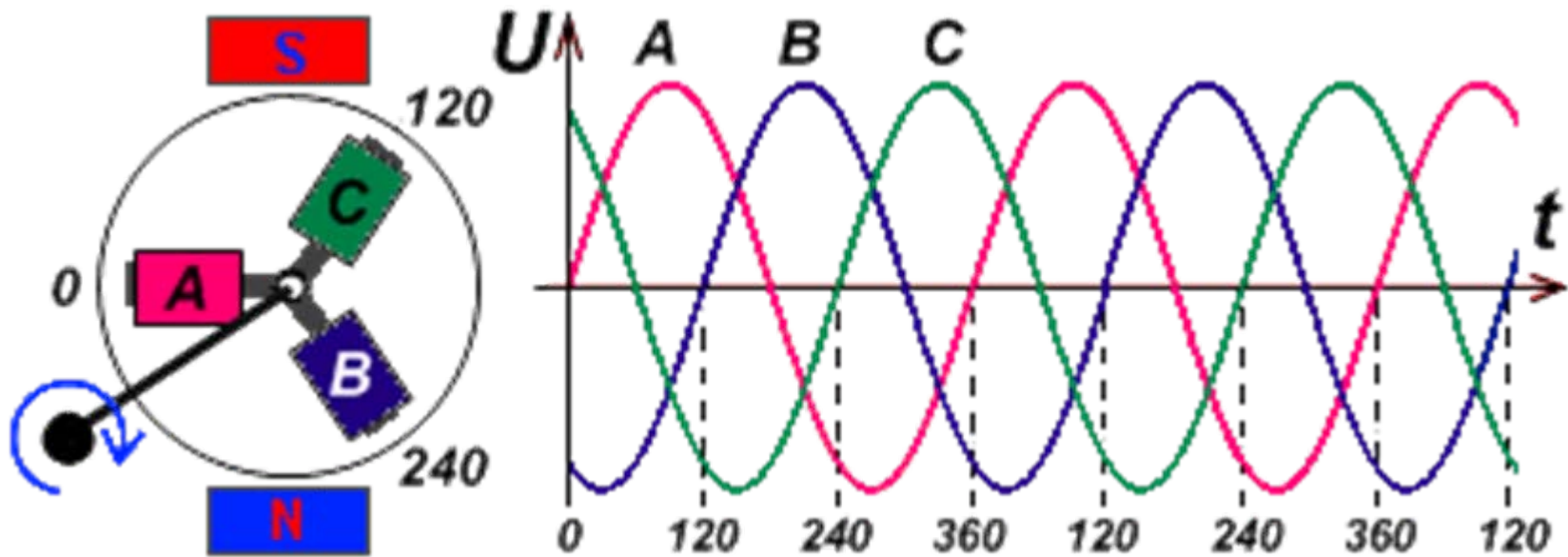
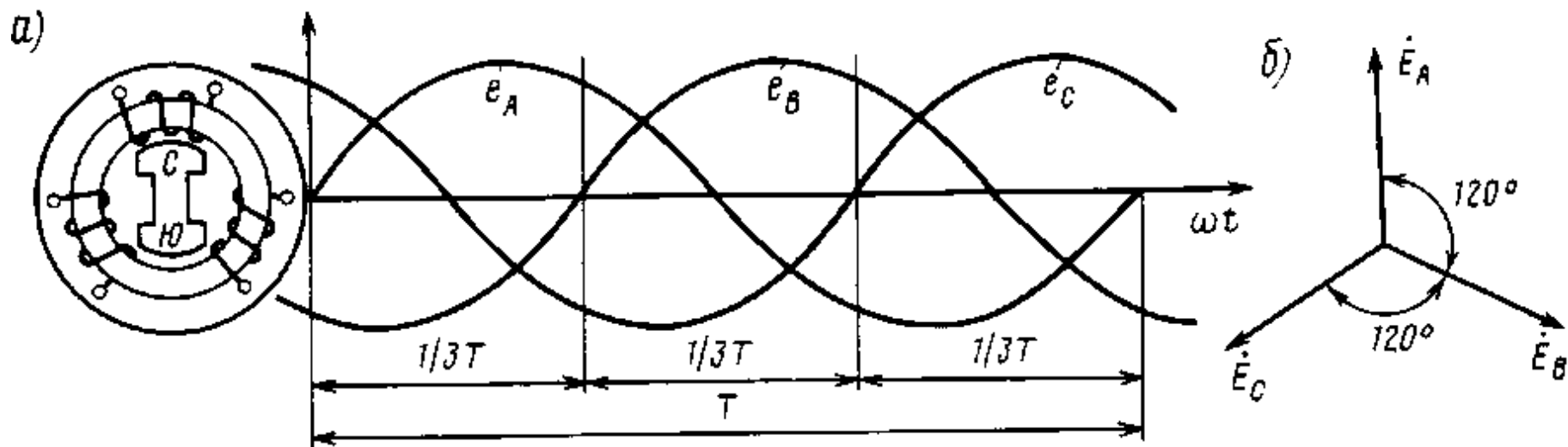
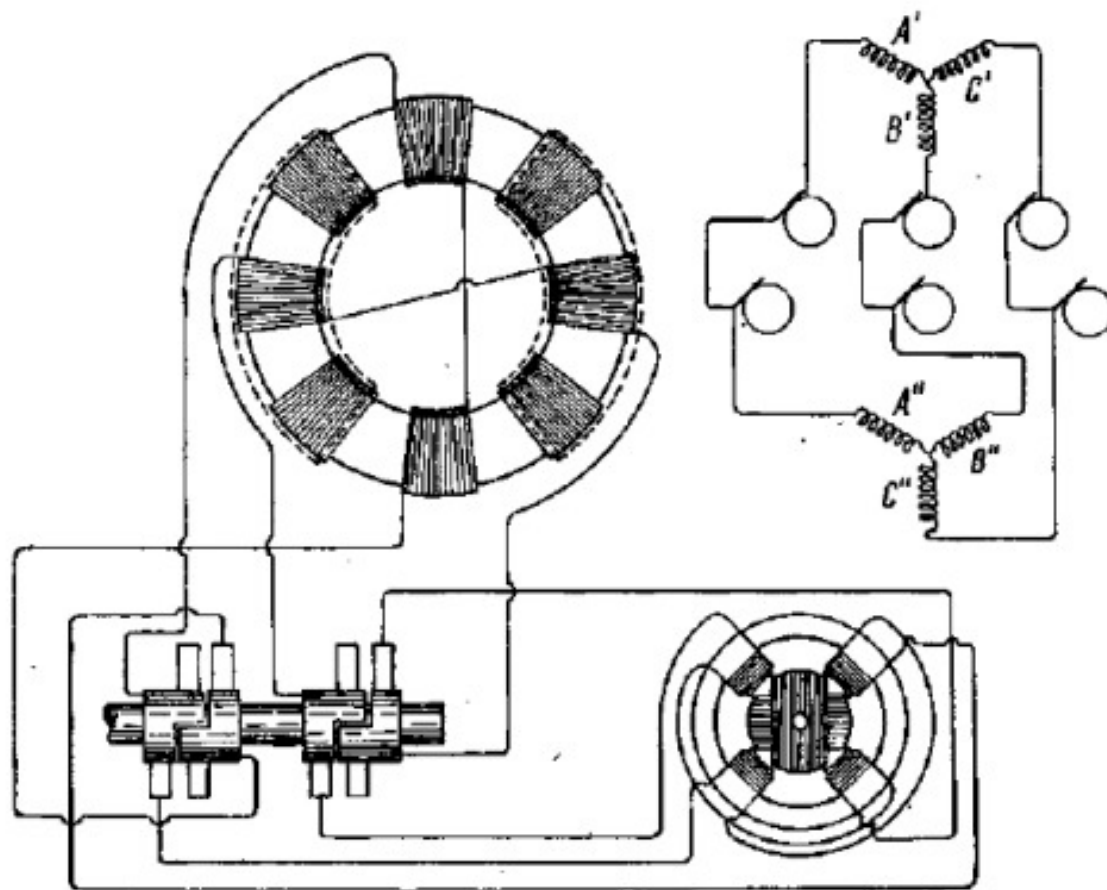


Рис. 206 Получение двухфазного тока

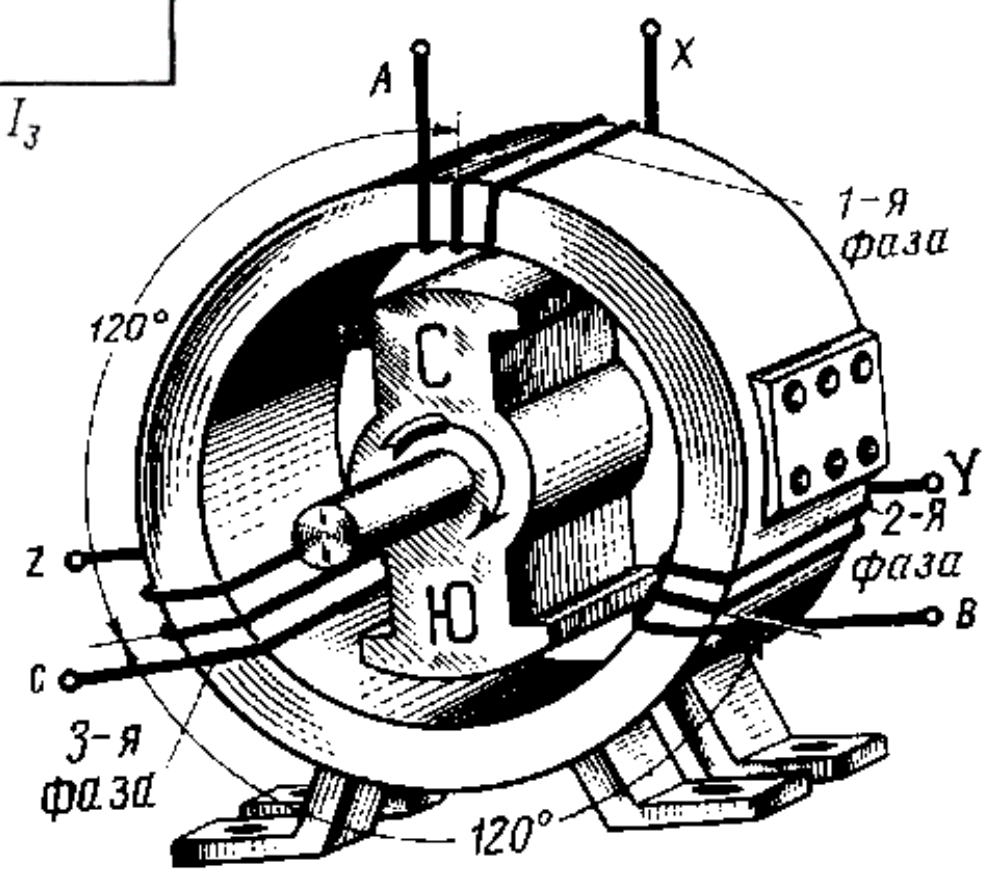
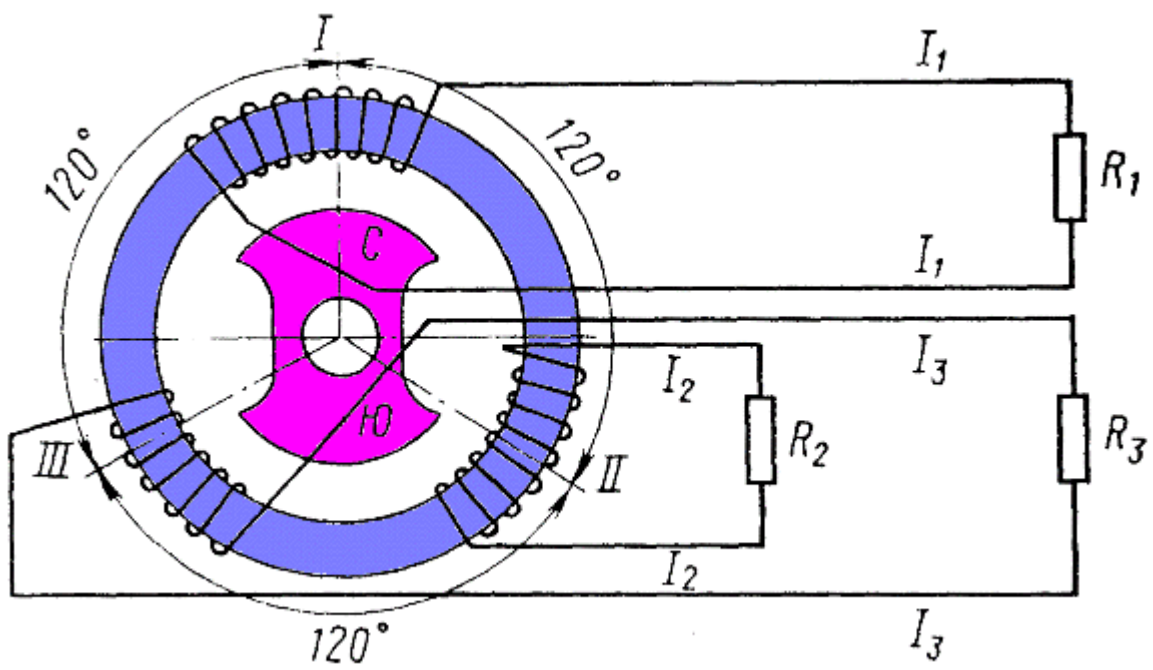
Трѳофазний струм

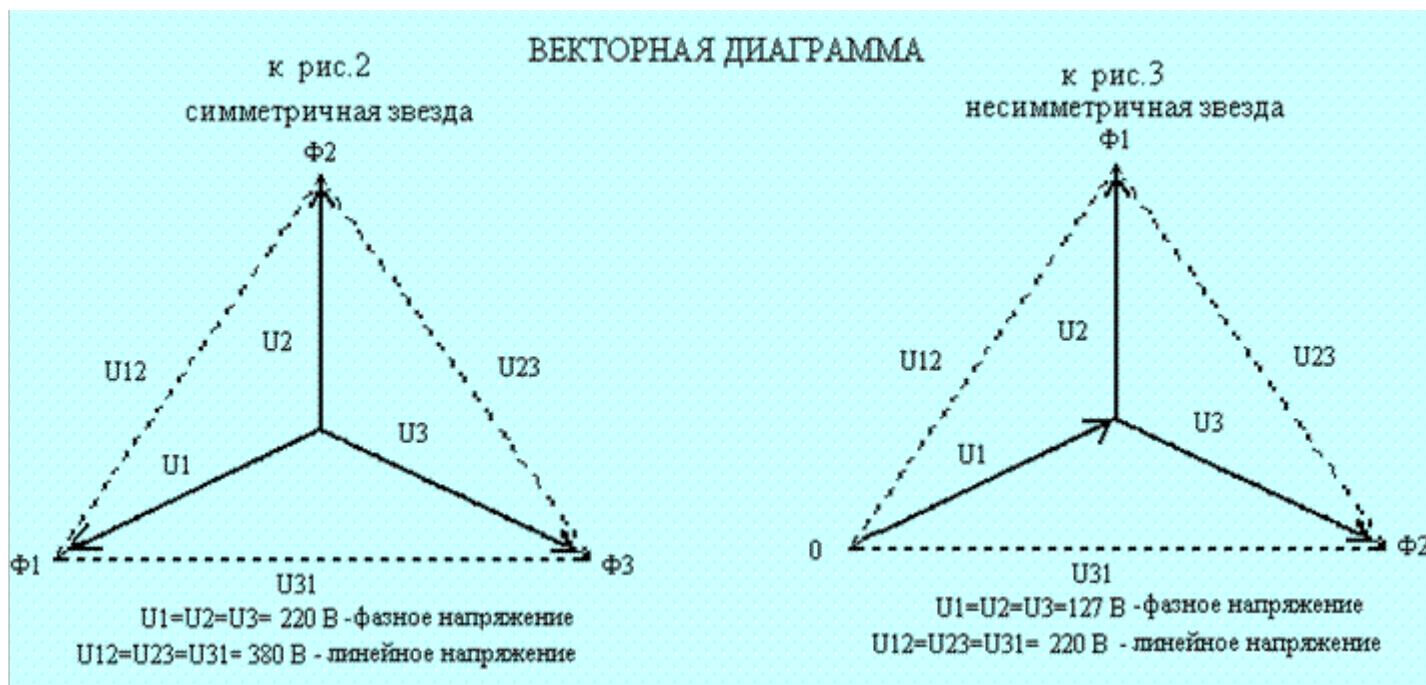
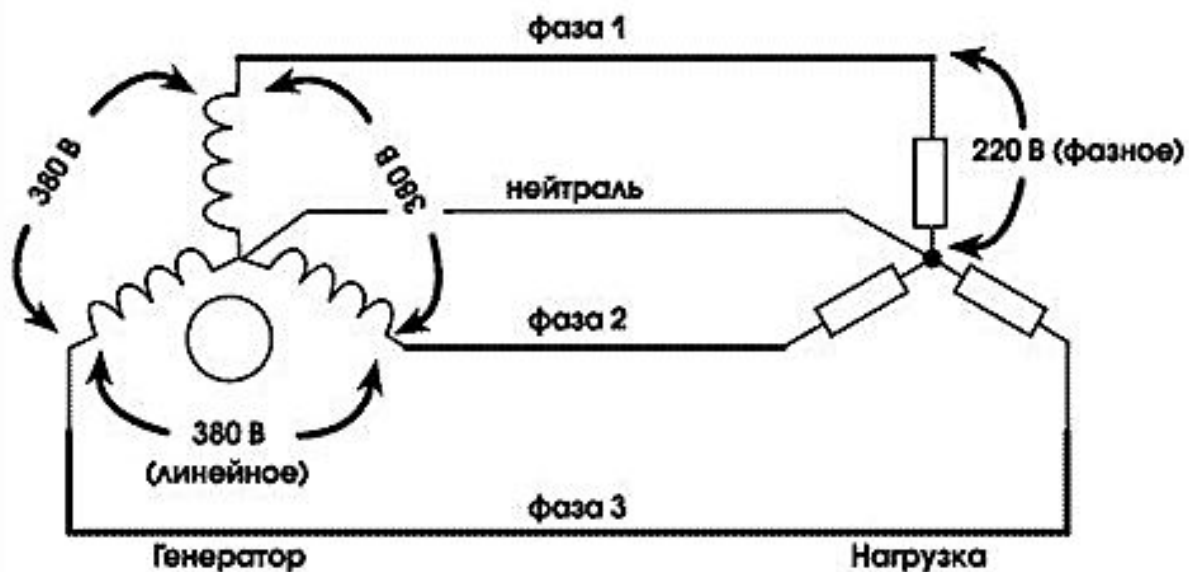




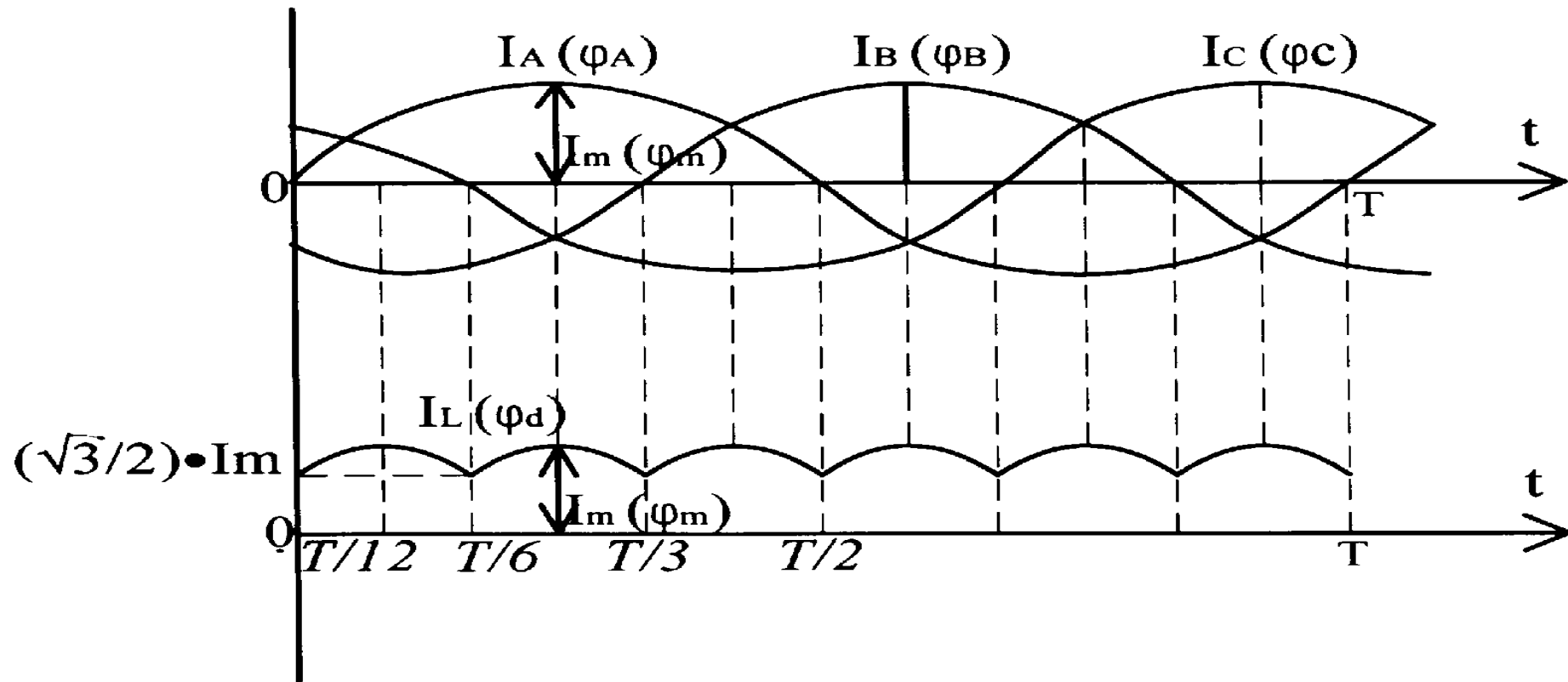
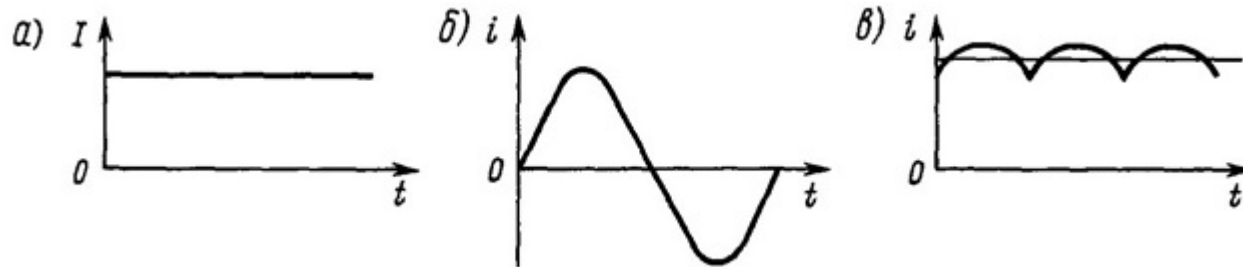
3-х фазная система Тесла
по патенту № 390414

Весьма важными были патенты Никола Тесла опубликованные 2 октября 1888 года № 390413 и 390414, особенно последний, в котором Тесла закрепил свой приоритет в 3-фазной системе

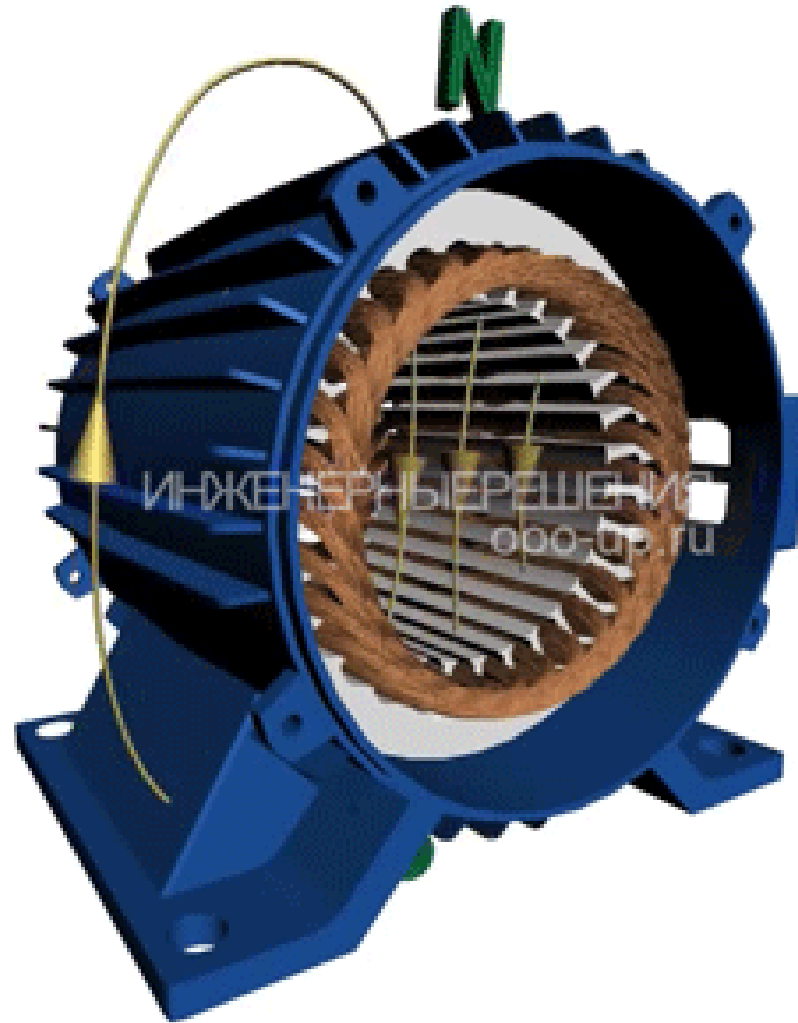




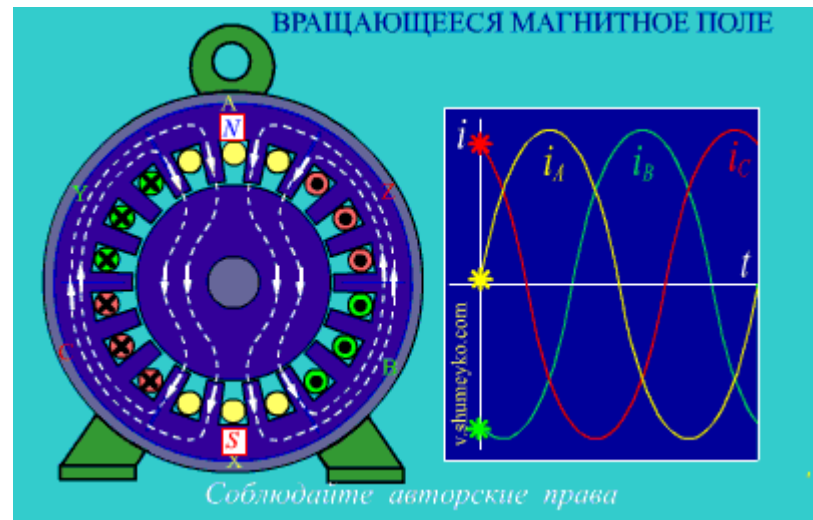
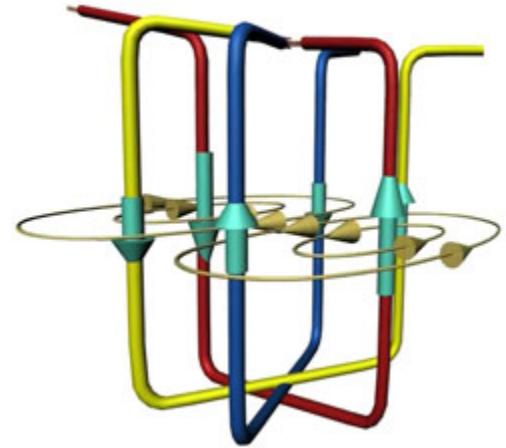
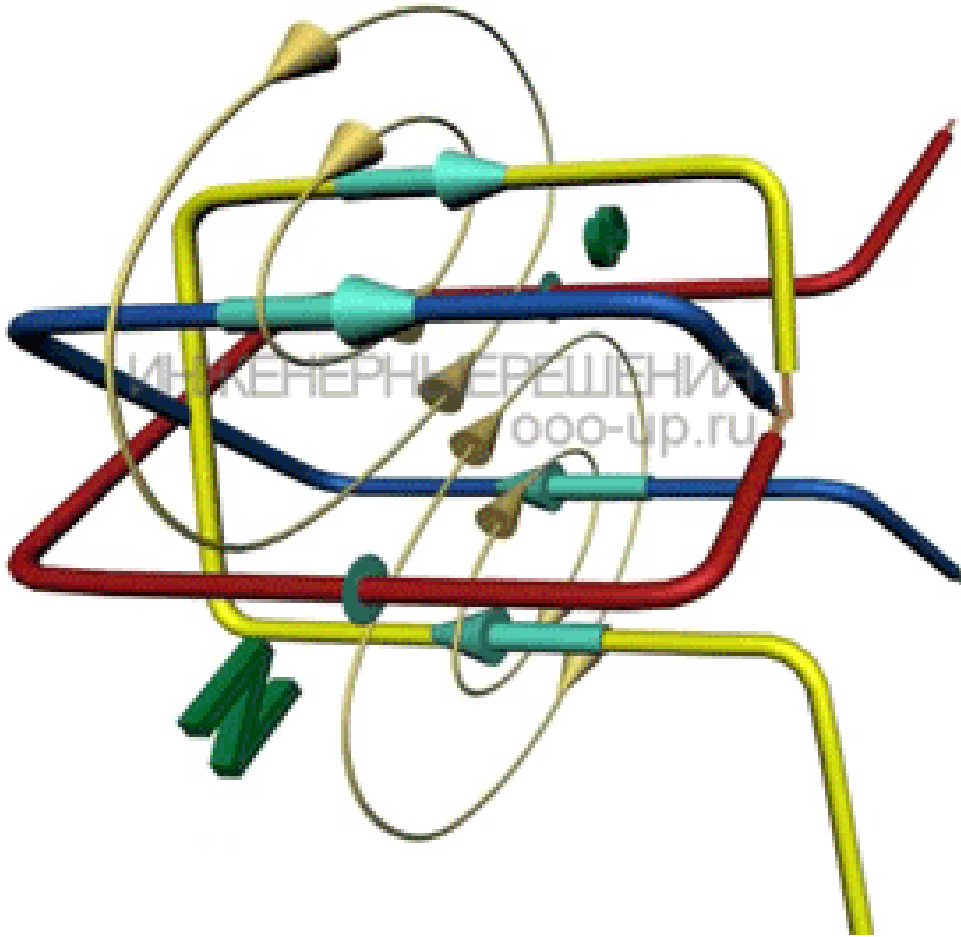
Можна отримати пульсуючу напругу, ближчу до сталої

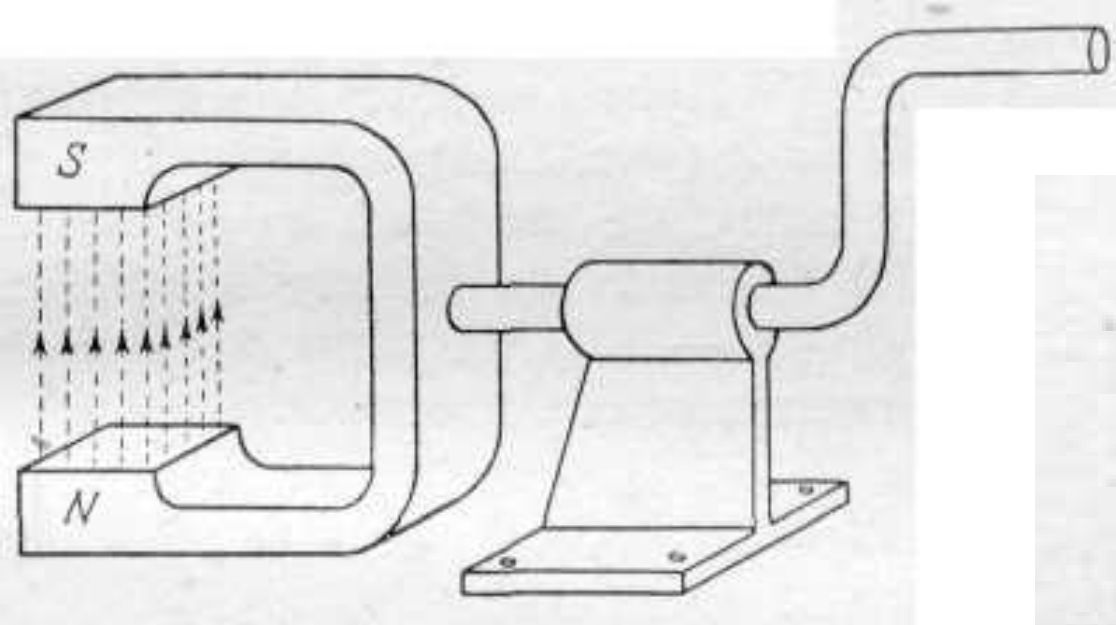


Електродвигуни використовують магнітне поле статора, яке обертається та обертає ротор



Його створює змінний струм в обмотці, часто трьохфазний

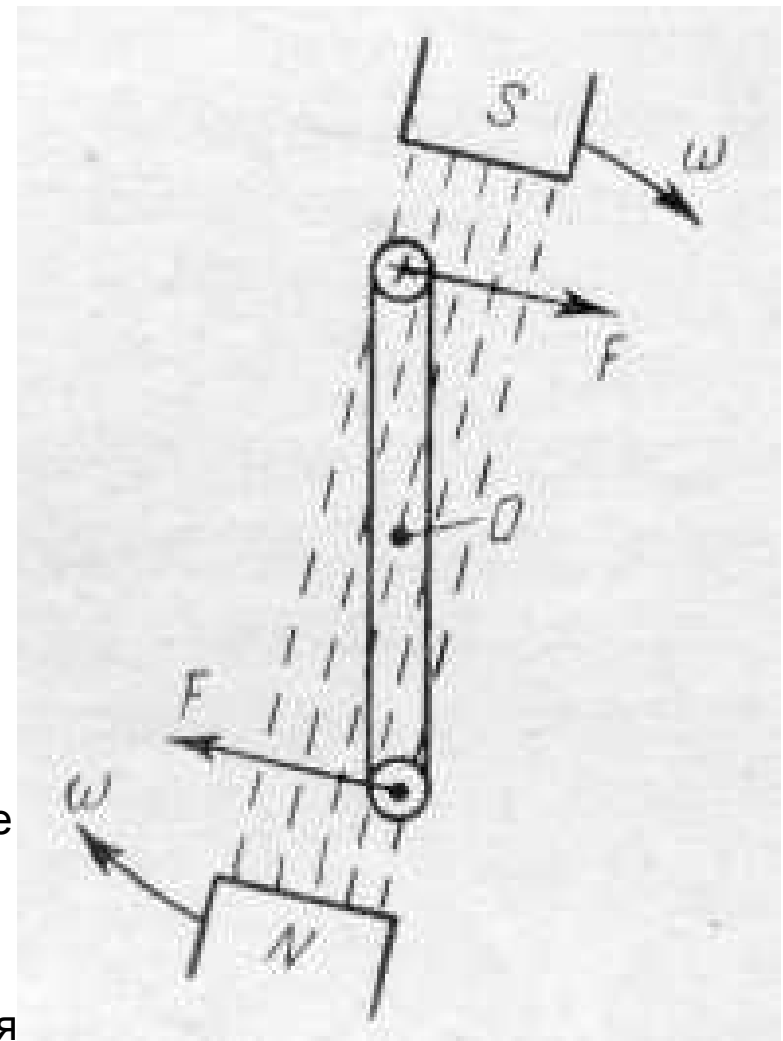




Вращающееся магнитное поле
постоянного магнита.

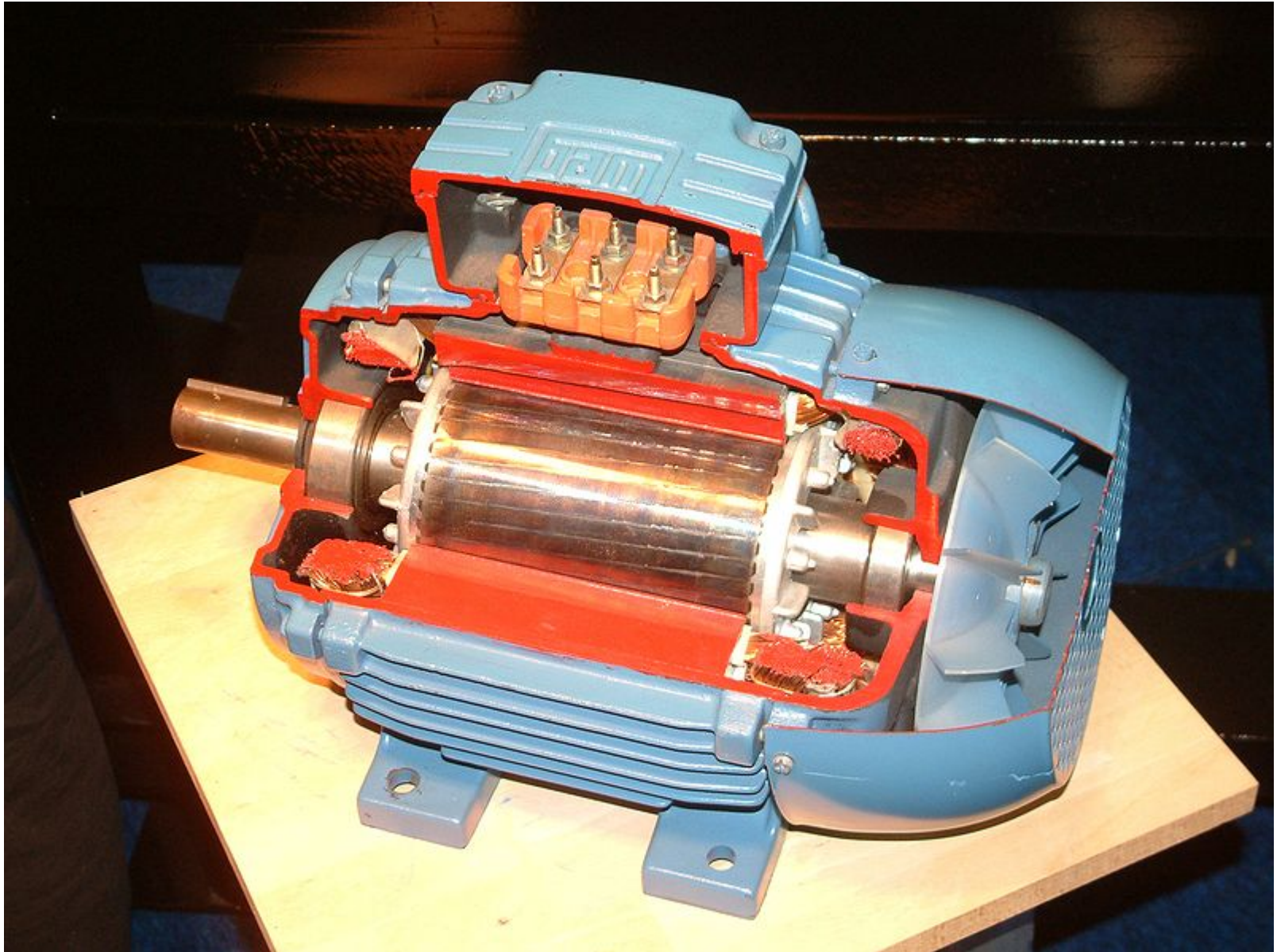
Если в такое поле поместить магнитную стрелку,
то она будет стремиться установиться вдоль
линий поля и поэтому придет во вращение в ту же
сторону, в которую вращается поле.

Подобно магнитной стрелке будет вести себя
замкнутый виток проволоки. Вследствие движения
поля относительно витка в проволоке возникнет
индукционный ток, который в соответствии с
правилом правой руки будет направлен так, как
показано на рис.

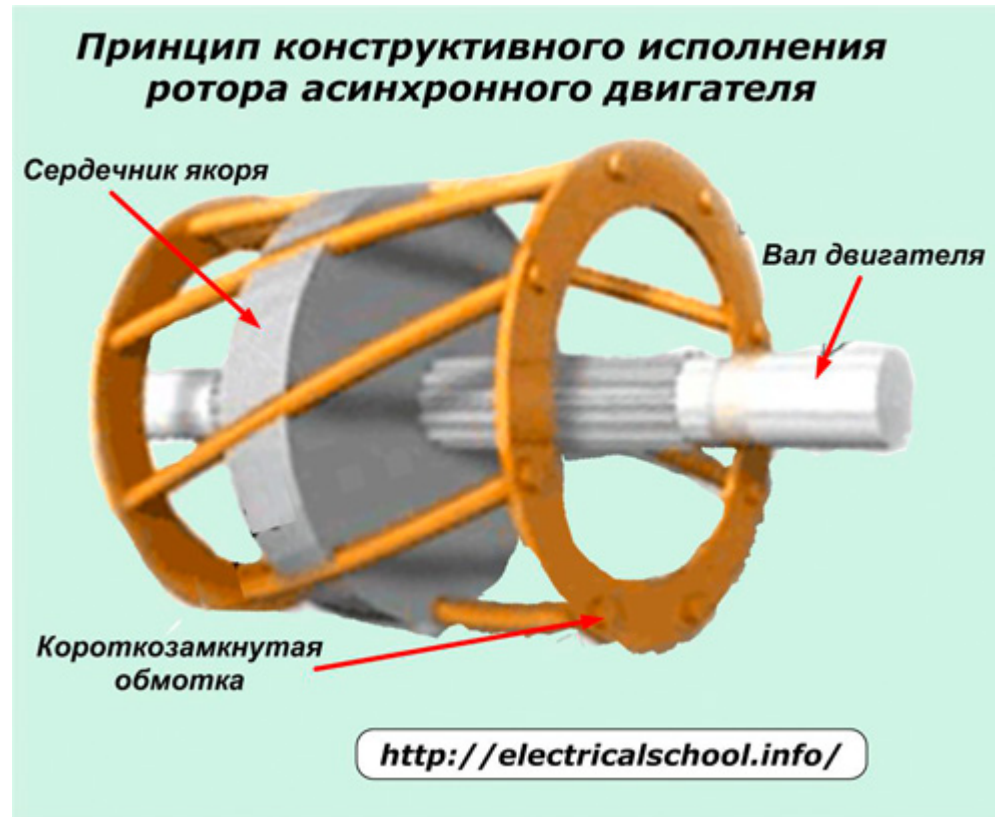


Действие вращающегося
магнитного поля на замкнутый
виток проволоки.

У синхронному двигуні ротор обертається з тією ж частотою. Його можна замінити постійним магнітом на осі.



У асинхронного двигателя ротор є замкнутий, наприклад “біляче колесо”.



Приоритет Никола Тесла в области асинхронных двигателей от 1888 г. неоспорим.

Семь основных патентов Теслы на асинхронные двигатели от 1 мая 1888 г.:

№ 381968 Электромагнитный мотор,

№ 382280 Электрическая передача мощности,

№ 382279 Электромагнитный двигатель,

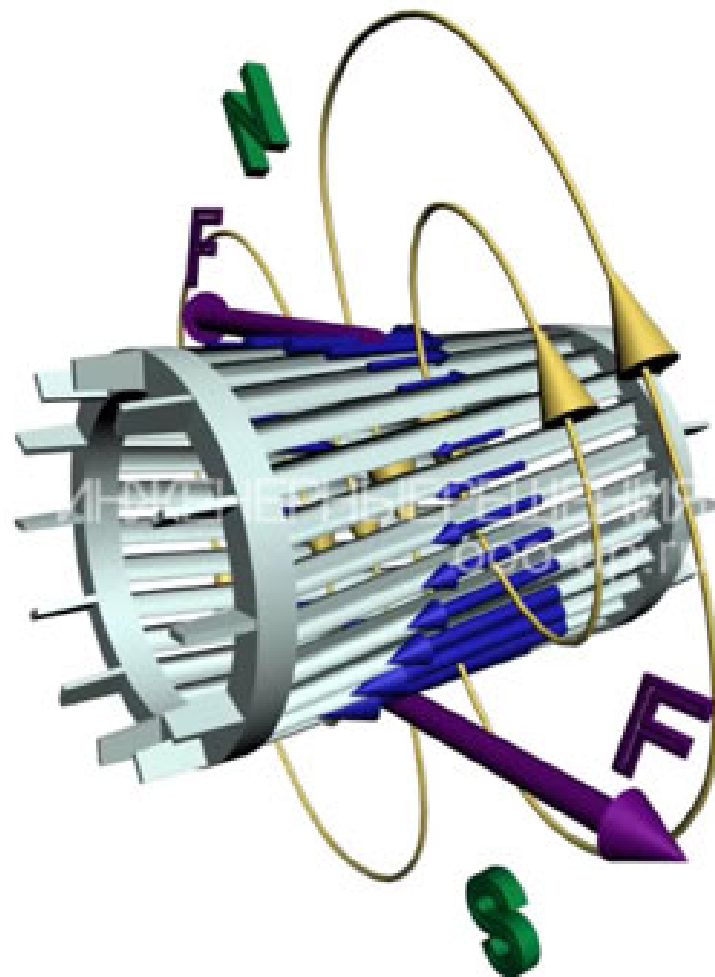
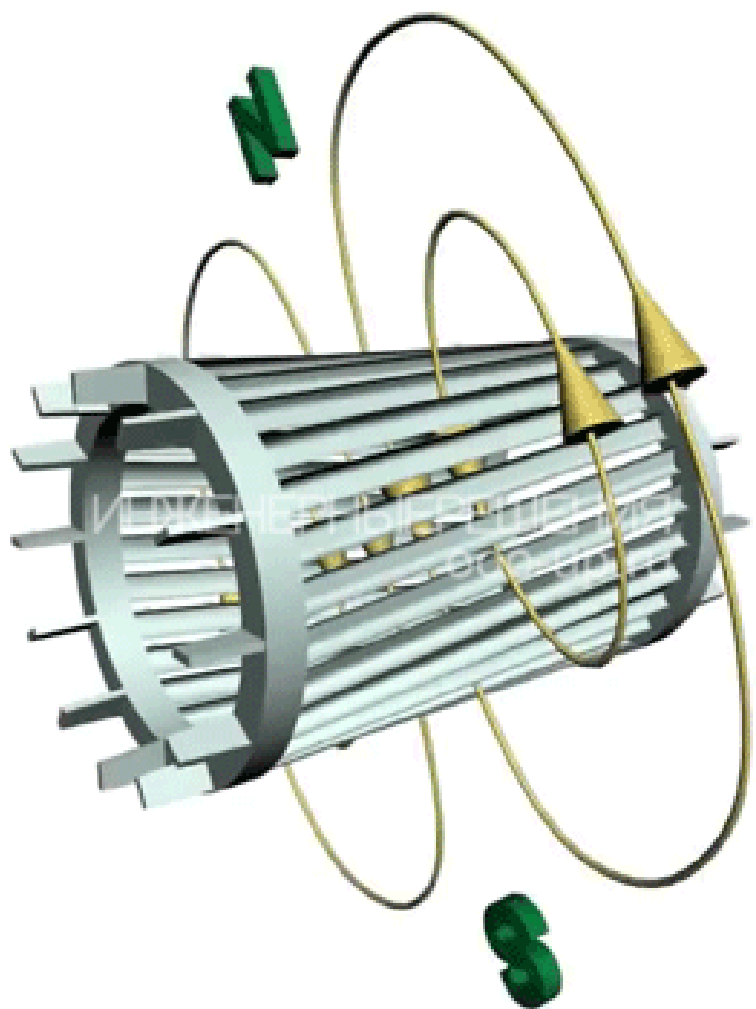
№ 381969 Электромагнитный двигатель,

№ 382281 Электрическая передача мощности,

№ 381970 Система распределения электроэнергии,

№ 382282 Система распределения электроэнергии.

Через нього проходить магнітне поле, що обертається у системі відліку ротора. Воно наводить струми Фуко, на які діє обертаючий момент.



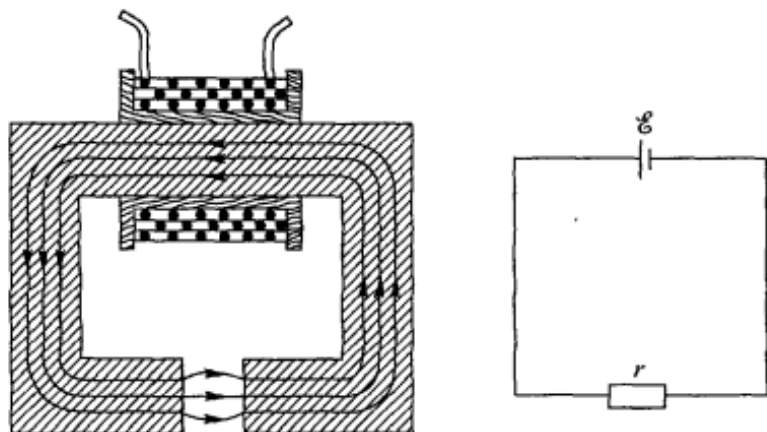


Рис. 194. Неразветвленная магнитная цепь и соответствующая ей электрическая цепь

Магнітні кола

поток Φ :

$$\Phi = \frac{Ni}{l/(\mu\mu_0 S) + l_1/(\mu_1\mu_0 S)}.$$

Полученная формула подобна закону Ома для замкнутой электрической цепи, изображенной на рис. 194. При этом величина

$$\mathcal{E}_m = Ni \quad (120.1)$$

играет роль электродвижущей силы, и поэтому по аналогии она получила название *магнитодвижущей силы*. Единица магнитодвижущей силы в системе СИ есть ампер. Сумма

$$R_m = \frac{l}{\mu\mu_0 S} + \frac{l_1}{\mu_1\mu_0 S} \quad (120.2)$$

входит в формулу так же, как и полное сопротивление электрической цепи в закон Ома, и поэтому ее называют *полным магнитным сопротивлением цепи*. Величины

$$r_m = l/\mu\mu_0 S, \quad r_{m1} = l_1/\mu_1\mu_0 S \quad (120.3)$$

дают магнитные сопротивления участков цепи. Магнитное сопротивление зависит от длины магнитопровода l и его сечения S , так же как и электрическое сопротивление, но роль удельной электрической проводимости λ играет магнитная проницаемость $\mu\mu_0$.

Пользуясь этими понятиями, мы можем представить полученные результаты следующим образом:

$$\Phi = \mathcal{E}_m/R_m. \quad (120.4)$$

Иными словами, в неразветвленной магнитной цепи магнитный поток равен частному от деления магнитодвижущей силы на полное магнитное сопротивление.

Из формулы (120.4) видно, что магнитное сопротивление в системе единиц СИ измеряется в амперах на вебер (А/Вб).

Сравнивая (120.2) и (120.3), мы также видим, что полное сопротивление нашей цепи равно сумме сопротивлений ее частей:

$$R_m = r_m + r_{m1}.$$

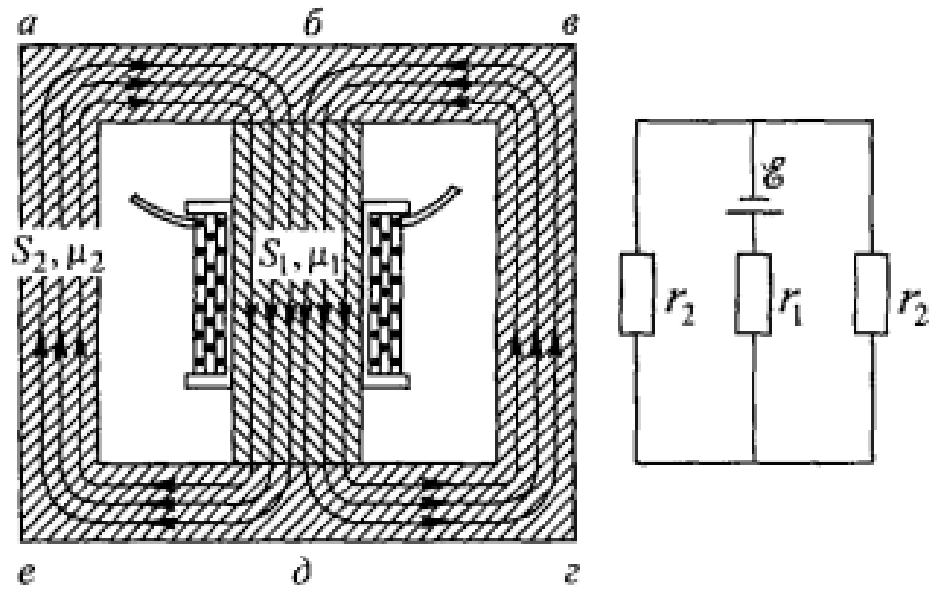
Рассмотрим сначала простую, или неразветвленную магнитную цепь (рис. 194). Будем считать, что она составлена из двух частей: ярма с сечением S из материала с магнитной проницаемостью μ и зазора (например, воздушного), имеющего то же сечение и магнитную проницаемость μ_1 . Выделим далее среднюю линию индукции и применим к ней теорему о магнитном напряжении (§ 81):

$$Hl + H_1 l_1 = Ni,$$

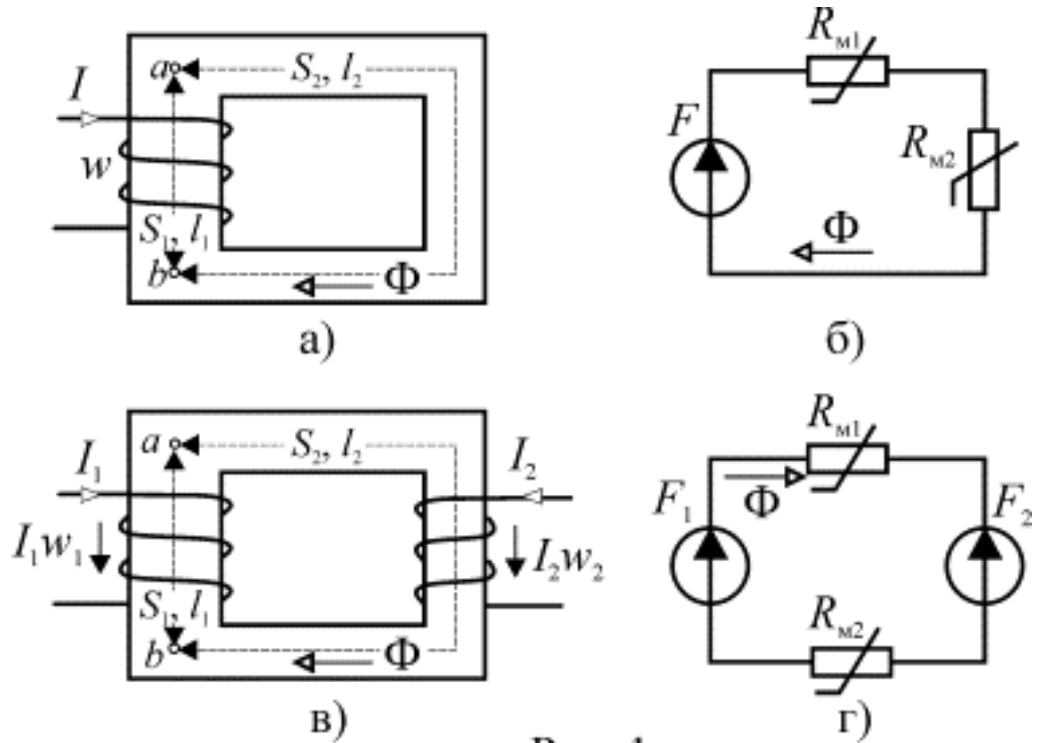
где H — напряженность поля внутри ярма, H_1 — напряженность поля внутри зазора, l — длина ярма, измеренная вдоль средней линии индукции, l_1 — длина зазора, N — число витков обмотки, а i — сила тока в ней.

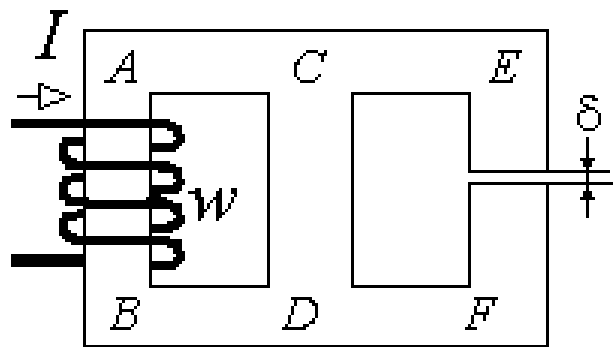
Так как линии индукции непрерывны, то значения магнитного потока Φ внутри ярма и внутри зазора одинаковы. Далее, пользуясь соотношениями $\Phi = BS$, $B = \mu\mu_0 H$, напряженность поля можно выразить через поток:

$$H = \frac{\Phi}{\mu\mu_0 S}, \quad H_1 = \frac{\Phi}{\mu_1\mu_0 S}.$$

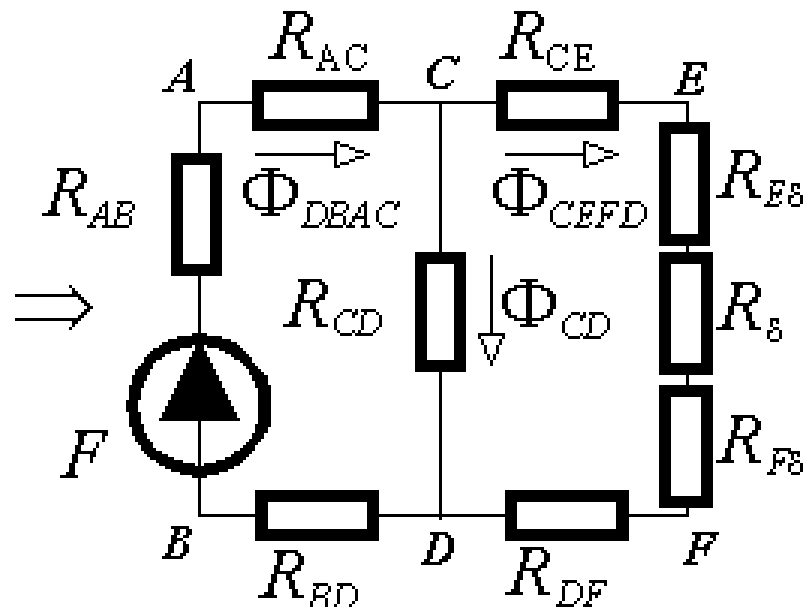


Магнитная цепь с разветвлением магнитного потока





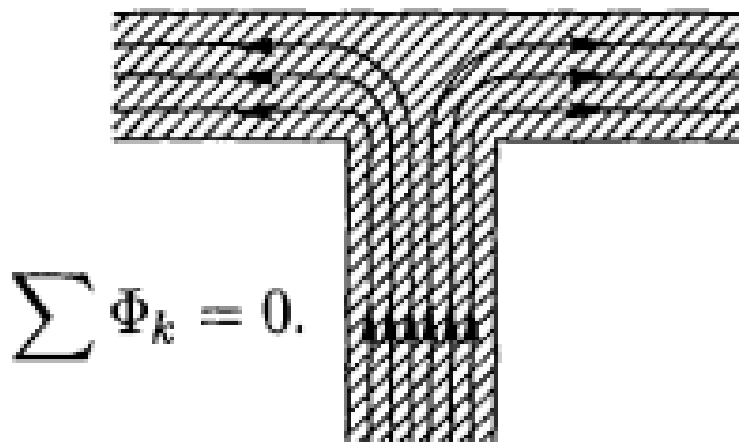
a)



б)

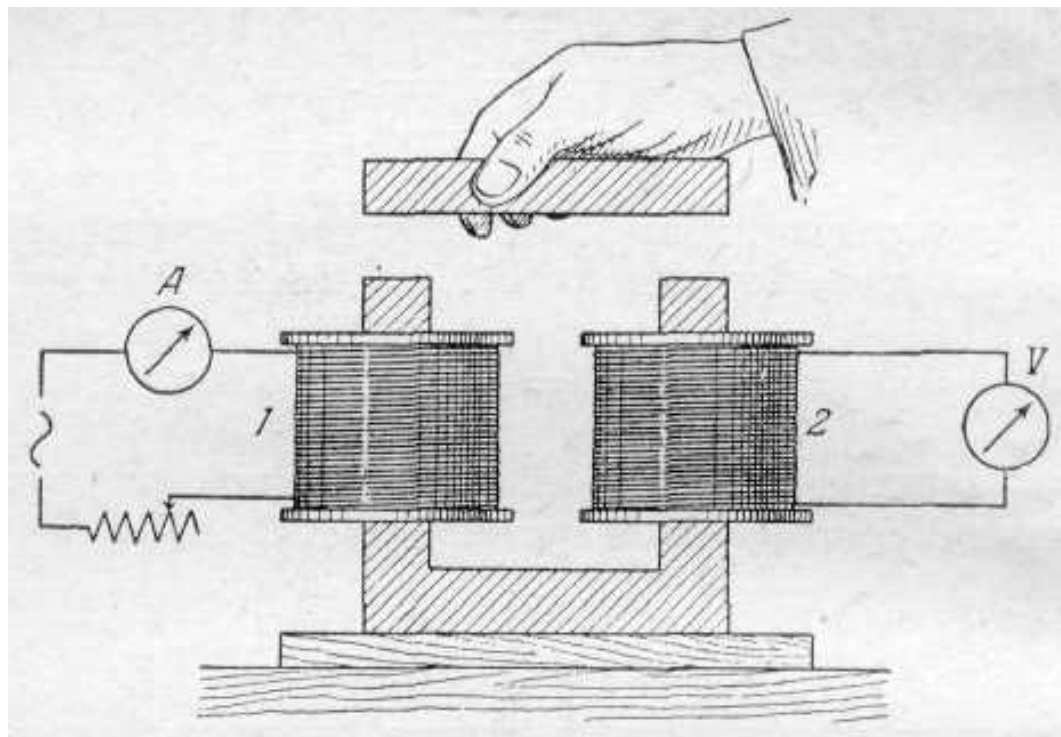
Закони Кірхгофа для магнітних кіл

$$\sum \Phi_k R_k = \sum \mathcal{E}_m$$

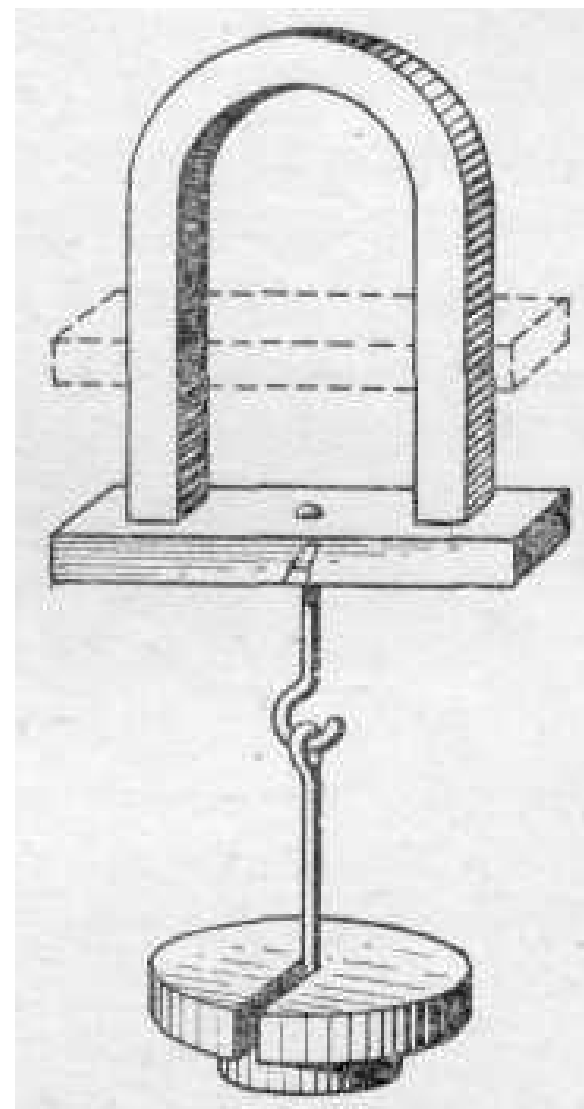


$$\sum \Phi_k = 0.$$

Разветвление магнитного потока

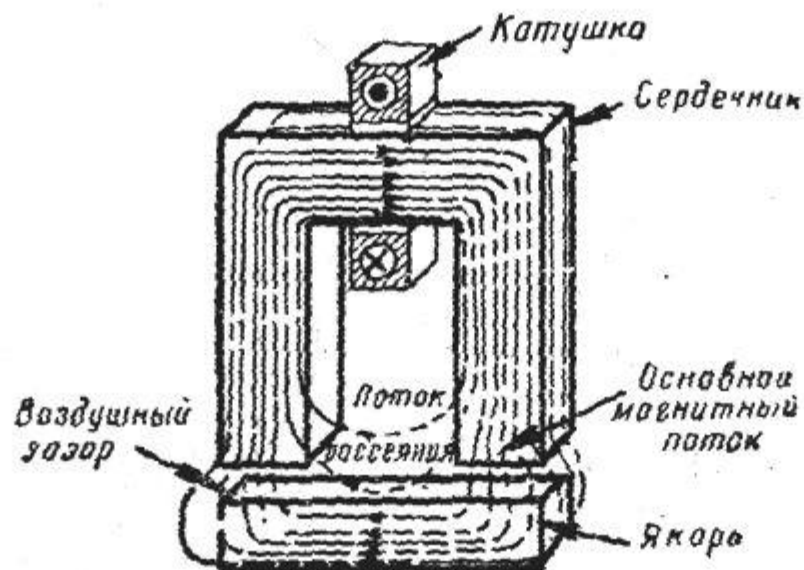


При замыкании железного сердечника его магнитное сопротивление уменьшается и магнитный поток внутри него становится больше.

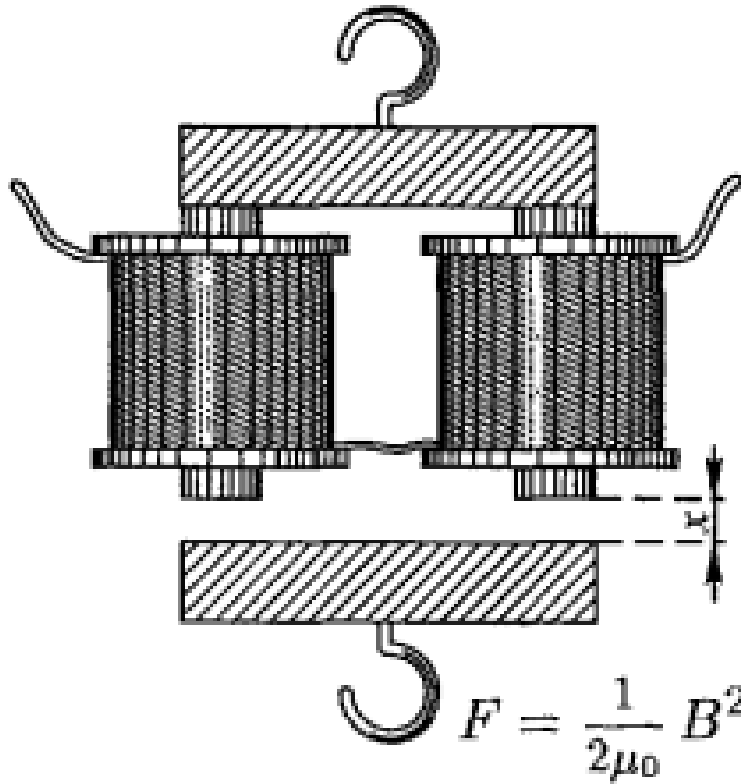


Магнитный шунт.

Магнитное поле



Магнитная цепь электромагнитного реле включает в себя три участка: сердечник с катушкой, якорь и два воздушных зазора. Магнитное поле в этой цепи создается током катушки; создаваемый ею магнитный поток замыкается через сердечник, якорь и воздушные зазоры.



$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu\mu_0 S} + \frac{2x}{\mu_0 S}} = \mu\mu_0 S \frac{NI}{l + 2\mu x}$$

$$\Psi = N\Phi$$

Зміна струму на $\delta I = -\frac{1}{R} \frac{d\Psi}{dt}$

Зміна роботи джерела струму

$$\mathcal{E}(I + \delta I)dt - \mathcal{E}Idt = -\frac{\mathcal{E}}{R} \frac{d\Psi}{dt} dt = -Id\Psi$$

Рис. 196. Електромагніт дорівнює зміні тепла

$$R(I + \delta I)^2 dt - RI^2 dt = 2RI\delta I dt = -2RI \frac{1}{R} \frac{d\Psi}{dt} dt = -2Id\Psi$$

плюс зміна енергії магнітного поля

$$dW = d\frac{LI^2}{2} = \frac{I^2}{2} dL = \frac{Id\Psi}{2}$$

плюс механічна робота по підняттю тягара $dA = F dx$

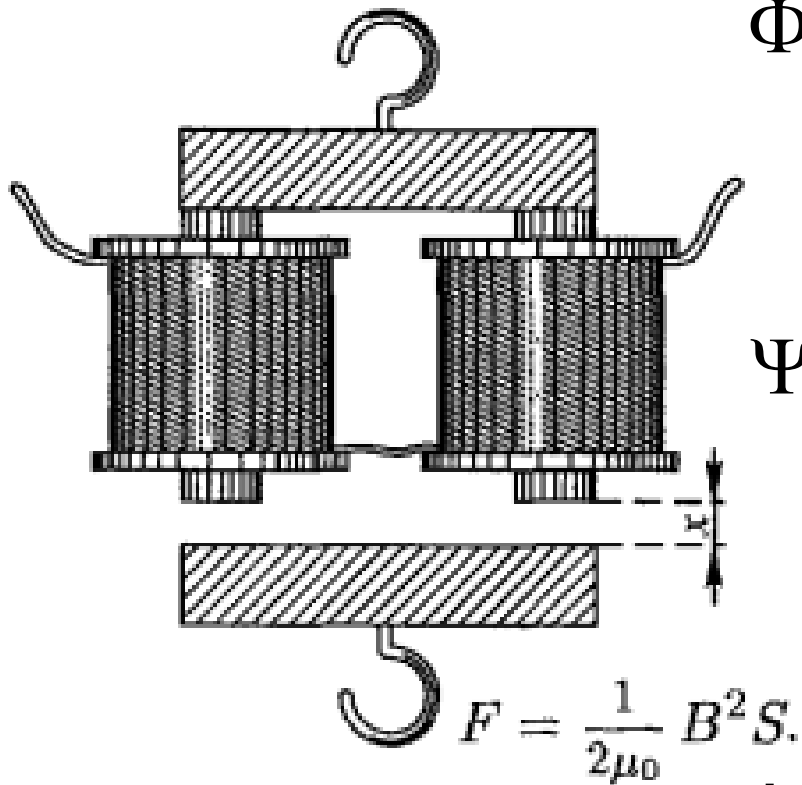


Рис. 196. Электромагнит

$$F = -\frac{SB^2}{\mu_0} = -\frac{2SB^2}{2\mu_0}$$

$$= -\frac{S_{contact}B^2}{2\mu_0}$$

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu\mu_0 S} + \frac{2x}{\mu_0 S}} = \mu\mu_0 S \frac{NI}{l + 2\mu x}$$

$$\Psi = N\Phi, \quad B = \frac{\Phi}{S} = \mu\mu_0 \frac{NI}{l + 2\mu x}$$

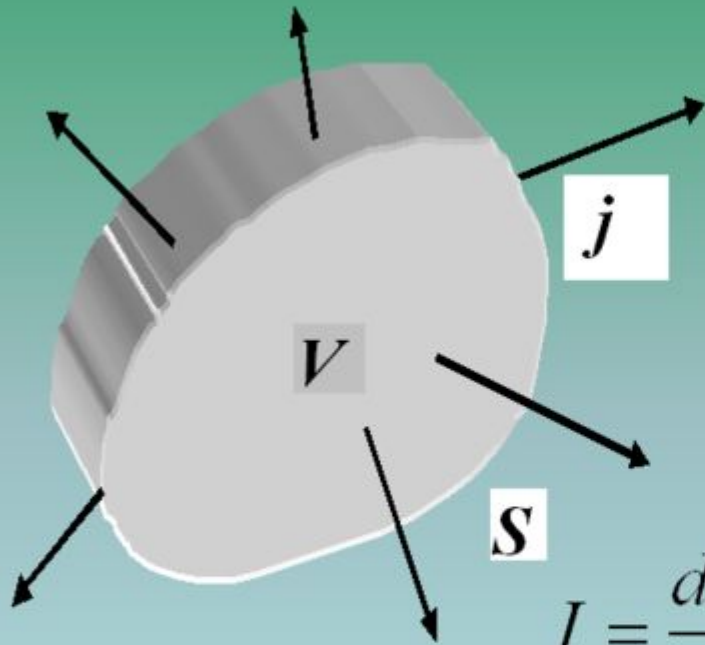
$$F = \frac{I}{2} \frac{d\Psi}{dx} = \frac{NI}{2} \frac{d\Phi}{dx} =$$

$$= -\frac{NI}{2} \frac{2\mu_0\mu^2 ISN}{(l + 2\mu x)^2} =$$

$$= -\frac{S}{\mu_0} \left(\frac{\mu_0\mu NI}{l + 2\mu x} \right) = -\frac{SB^2}{\mu_0}$$

Рівняння неперервності – наслідок закону збереження заряду $\operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

Уравнение непрерывности



Теорема

Остроградского-Гаусса:

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \vec{j} dV.$$

$$I = \frac{dq}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV.$$

Знак минус в уравнении означает то, что заряды уходят из объема V .

$$\int_V \left(\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) dV = 0$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} \int_{\mathcal{S}} \mathbf{j} d\mathbf{S} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{S}} \mathbf{D} d\mathbf{S},$$

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{S}} \mathbf{B} d\mathbf{S},$$

$$\oint \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0,$$

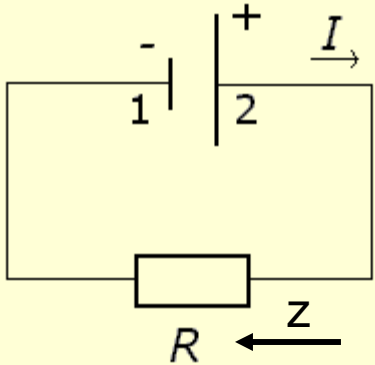
$$\oint \mathbf{D} d\mathbf{S} = 4\pi \int_V \rho dV.$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \Rightarrow 0 = \frac{4\pi}{c} \operatorname{div} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \operatorname{div} \vec{D}}{\partial t} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{4\pi}{c} \operatorname{div} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial (4\pi\rho)}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{4\pi}{c} \left(\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) = 0$$

Рівняння телеграфістів

Параметри розподілених вздовж дроту елементів позначено зірочками. R^* - лінійна густина опору, L^* - лінійна густина індуктивності, C^* - лінійна густина ємності.



$$\varphi_2 - \varphi_1 = RI \Rightarrow R^* dz I = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} dz$$

Для змінного струму маємо (κ - заряд одиниці довжини)

$$R^* dz I = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} dz - \frac{1}{c^2} L^* dz \frac{\partial I}{\partial t}$$

$$\varphi = \frac{\kappa}{C^*} \Rightarrow R^* I = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\kappa}{C^*} \right) - \frac{1}{c^2} L^* \frac{\partial I}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} = -\frac{\partial I}{\partial z} \quad (\text{аналог рівняння неперервності})$$

$$\frac{1}{c^2} L^* \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} + R^* \frac{\partial I}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{C^*} \frac{\partial I}{\partial z} \right) = \frac{1}{C^*} \frac{\partial^2 I}{\partial z^2}$$

$$\frac{1}{c^2} L^* \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} + R^* \frac{\partial I}{\partial t} = \frac{1}{C^*} \frac{\partial^2 I}{\partial z^2}, \quad I = A(z) e^{i\omega t}$$

$$\frac{d^2 A}{dz^2} = -u^2 A, \quad u^2 = \frac{\omega^2 L^* C^*}{c^2} - i\omega R^* C^*$$

$$u = k - is, \quad k^2 - s^2 = \frac{\omega^2 L^* C^*}{c^2}, \quad 2ks = \omega R^* C^*$$

$$I = I_0 e^{-sz} e^{i(\omega t - kz)}, \quad v = \frac{\omega}{k} = \frac{2s}{R^* C^*}$$

$$s^2 = \frac{\omega^2 L^* C^*}{2c^2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{c^2 R^*}{\omega L^*} \right)^2} - 1 \right]$$

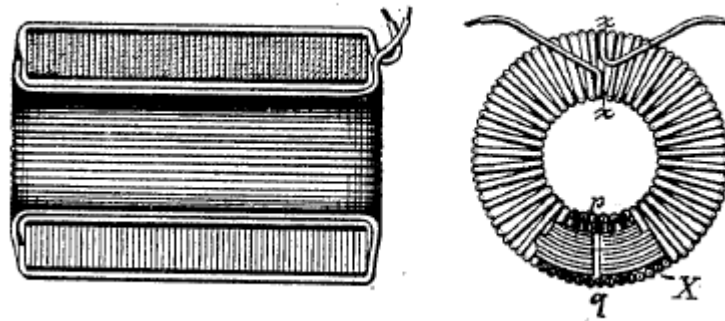
Якщо $\frac{c^2 R^*}{\omega L^*} \ll 1$

$$s^2 \approx \frac{\omega^2 L^* C^*}{2c^2} \frac{1}{2} \left(\frac{c^2 R^*}{\omega L^*} \right)^2 = \frac{C^* R^{*2} c^2}{4L^*}$$

$$v = \frac{2s}{R^* C^*} = \frac{c}{\sqrt{C^* L^*}} = \text{const}$$

Сигнали поширюються з однаковою швидкістю, нема впливу скін-ефекту.

Для того, щоб забезпечити виконання умови $\frac{c^2 R^*}{\omega L^*} \ll 1$ збільшують L^* , застосувавши пупінові котушки (Loading coil або Pupin coils на честь серба Михайло Пупіна)



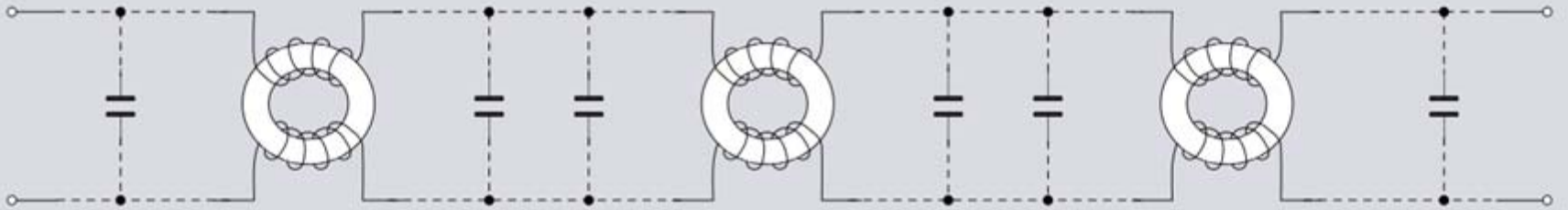


Схема збалансованої завантаженої телефонної лінії. Конденсатори не є дискретними компонентами, але являють собою розподілену ємність між близько розташованими дротяними провідниками лінії, це позначено пунктирними лініями. Пупінові котушки запобігають спотворенню звукового сигналу (голосу). Обмотки котушки намотані так, що магнітний потік, індукований в ядрі йде в тому ж напрямку для обох обмоток.

Котушка навантаження в невеликій антені стільникового телефону на даху автомобіля.



Величезну котушку навантаження антени використовував потужний довгохвильовий радіотелеграфний передавач в Нью-Джерсі в 1912 році.