

Размагничивающее действие переменного тока.

Одновременное намагничивание железного сердечника переменным и постоянным токами, или же помещение железа в магнитное поле, имеющее постоянную и переменную слагающие, вызывает ряд явлений, имеющих и могущих найти на практике различные применения. Настоящая статья, описывающая эти явления, представляет часть результатов опытов производимых в электротехнической лаборатории Сибирского Технологического Института.

Предположим, что на некотором сердечнике (черт. 1) имеются две катушки, из которых первая, имеющая W_1 витков, питается постоянным током силой J_0 , а вторая, имеющая W_2 витков, — переменным током с амплитудой J_m и угловой скоростью $\omega = 2\pi c$, где c частота. Магнитный поток, проходящий в сердечнике, будет иметь, при одновременном включении обеих катушек, как постоянную, так и переменную слагающие. Если предположить, что материал сердечника имеет постоянную, независимую от индукции, магнитную проницаемость, то между мгновенными величинами должна иметься линейная зависимость

$$\sum i W = a w = K \Phi \dots \dots \dots (1).$$

где K — коэффициент пропорциональности, а i , w и Φ — мгновенные значения силы тока, общих ампервитков и магнитного потока. При синусоидальном изменении переменной силы тока, мгновенное значение ампервитков будет равно

$$a w = \sum i W = J_0 W_1 + J_m W_2 \cdot \sin \omega t \dots \dots \dots (2).$$

Если ток несинусоидален, то, разлагая в ряд Фурье, получим

$$a w = \sum i W = J_0 W_1 + W_2 \cdot \sum J_{mn} \cdot \sin (n\omega t + \alpha_n) \dots \dots (2a).$$

Подставляя значение $a w$ из уравнения (2) в уравнение (1) найдем

$$\Phi = \frac{J_0 W_1}{K} + \frac{J_m W_2}{K} \cdot \sin \omega t = \Phi_0 + \Phi_m \sin \omega t \dots \dots (3)$$

где Φ_0 — постоянная слагающая магнитного потока, а Φ_m — амплитуда его переменной слагающей. Принимая несинусоидальную форму тока, тем же путем получим из уравнения (2a)

$$\Phi = \frac{J_0 W_1}{K} + W_2 \sum \frac{J_{mn}}{K} \cdot \sin (n\omega t + \alpha_n) = \Phi_0 + \sum \Phi_{mn} \cdot \sin (n\omega t + \alpha_n).$$

Из полученных уравнений видим, что постоянная слагающая магнитного потока совершенно независит от переменного тока, а переменная — от постоянного. Высшие гармонические потока зависят тоже только от соответствующих составляющих силы тока того же порядка.

Напряжение на зажимах катушки переменного тока будет равно, считая омическое сопротивление очень малым, обратной величине противоэлектродвижущей силы

$$v = -e = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\Phi_m \cdot W_2 \cdot \omega \cdot \cos \omega t \dots \dots (4)$$

Из этого уравнения видим, что переменный поток, а следовательно и сила тока, при определенной частоте, зависит только

от приложенного напряжения, и совершенно не зависит от постоянного тока.

В катушке постоянного тока, под действием переменной слагающей потока, так же появится электродвижущая сила

$$e = \Phi_m \cdot W_1 \cdot \omega \cdot \cos \omega t.$$

Вследствие этого, в цепи постоянного тока начнет проходить переменный ток, который изменит все выводы и исказит полученные результаты, что бы избежать подобного влияния, необходимо применять двойные схемы (см. ниже в описании производства опытов), или же включать в эту цепь очень большие самоиндукции. В дальнейшем будем принимать, что в первой катушке переменного тока нет.

В действительности магнитная проницаемость сердечника не может быть постоянной, а изменяется в зависимости от индукции, так что уравнение (1), а следовательно и все остальные результаты, правильны лишь для катушек без сердечников (воздух). Выразить точно подобную же зависимость при переменной проницаемости невозможно, графическое же ее изображение (черт. 2) носит название кривой намагничивания (начальное намагничивание) и петли гистерезиса (перемагничивание). При отсутствии гистерезиса эту зависимость можно представить в виде ряда нечетных степеней

$$a W = \sum i w = k_1 \Phi + k_3 \Phi^3 + k_5 \Phi^5 + k_7 \Phi^7 + \dots \dots \dots (5)$$

при чем, для приближенных выводов, достаточно первых двух или трех членов. Для примера на черт. 3 приведены две опытных кривых намагничивания (пунктирные) и кривые, построенные по уравнениям

$$A W = 13,2 \left(\frac{B}{1000} \right) - 0,39 \left(\frac{B}{1000} \right)^3 + 0,00107 \left(\frac{B}{1000} \right)^5$$

для верхней (А), и

$$A W = 3,5 \left(\frac{B}{1000} \right) + 0,365 \left(\frac{B}{1000} \right)^3$$

для нижней (В). При применении большого числа членов, получается еще более лучшее совпадение кривых.

Приложенное переменное напряжение вызовет в сердечнике переменную составляющую магнитного потока. Так как уравнение (4) сохраняется и для данного случая, то, при синусоидальном напряжении.

$$\Phi = \frac{V_m}{W_2 \omega} \cdot \cos \omega t + C = \Phi_0 + \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Подставляя это уравнение в равенство (5), взяв для простоты вывода только два члена, получаем

$$a W = \sum i W = k_1 \left[\Phi_0 + \Phi_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \right] + \\ + k_3 \left[\Phi_0 + \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \right]^3$$

Это выражение, после ряда преобразований и замены степеней синуса через функции кратных углов, принимает вид

$$a W = \sum i w = [k_1 \Phi_0 + k_3 \Phi_0^3 + 3 k_3 \Phi_0 \Phi_m^2] + [k_1 \Phi_m + 3 k_3 \Phi_m^3 + \\ + 3 k_3 \Phi_0^2 \Phi_m] \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + 3 k_3 \Phi_0 \Phi_m^2 \cdot \sin 2 \omega t + \\ + k_3 \Phi_m^3 \cdot \sin \left(3 \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \dots \dots \dots (6).$$

Из этого уравнения видим, что для получения постоянной слагающей потока необходимо наличие постоянных ампервитков, так как таковые получиться в катушке переменного тока не могут (для этого необходимо наличие в ней постоянной электродвижущей силы), они равны

$$A W_0 = J_0 W_1 = k_1 \Phi_0 + k_3 \Phi_0^3 + 3 k_3 \Phi_0 \Phi_m^2 \dots (7).$$

Если бы переменного тока не было, то тому же току соответствовал бы поток Φ_0' .

$$A W_0 = J_0 W_1 = k_1 \Phi_0' + k_3 (\Phi_0')^3 \dots (8).$$

а тому же потоку—ампервитки $A W_0'$ или ток J_0' .

$$A W_0' = J_0' W_1 = k_1 \Phi_0 + k_3 \Phi_0^3 \dots (9)$$

Сопоставляя уравнение 7, 8 и 9, видим, что чем больше амплитуда Φ_m , а следовательно и приложенное напряжение, тем больше требуется постоянная сила тока для создания того же магнитного потока Φ_0 . Если же сила постоянного тока неизменна, то магнитный поток Φ_0 будет меньше, чем при выключенном переменном токе.

Таким образом, подключение переменного тока вызывает уменьшение магнитного потока (его постоянной слагающей), т. е. размагничивает сердечник. Подключение постоянного тока, не изменяя амплитуду потока (его переменной слагающей), увеличивает силу переменного тока и искажает его гармониками четных порядков.

Если в уравнении (5) взять не два, а большее количество членов, то характер полученных выводов не изменится, добавятся лишь новые члены. Подобный же результат получится при принятии несинусоидальной формы для кривой напряжения.

Когда переменного тока нет, точка, определяемая координатами J_0 и Φ_0 , должна лежать на кривой намагничивания. Как только переменный ток будет включен, эта точка будет перемещаться ниже. Считая, что она все же будет лежать на той же кривой, придется допустить, что переменный ток создает действие, аналогичное постоянным ампервиткам. Действительно, под влиянием переменного тока, в уравнении (6) появляется член

$$3 k_3 \Phi_0 \Phi_m^2 = A W_0''$$

представляющий постоянную слагающую для величины ампервитков. Это размагничивание должно компенсироваться соответствующим увеличением постоянного тока. Уравнение (7) может быть представлено в виде

$$A W_0' = A W_0 - A W_0'' = k_1 \Phi_0 + k_3 \Phi_0^3$$

где $A W_0'$ —кажущаяся величина постоянных ампервитков, соответствующая потоку Φ_0 .

На чертежах (4) и (5) произведено построение кривой силы тока по кривой намагничивания, при включенном постоянном токе и без него. Отрезок *oe* представляет силу постоянного тока, а *eb*—соответственный магнитный поток. При включенном переменном токе, постоянная слагающая потока снизится до величины, равной отрезку *ea = dc*, при чем точка *a* найдется из условия равенства площадей кривой силы тока по обе стороны оси. Отрезок *de* будет представлять размагничивающее влияние переменного тока, отнесенное к постоянному току.

Если постоянная слагающая потока вызвана не силой тока, а является остаточным намагничиванием, то и тогда должно иметься размагничивающее действие переменного тока. Это вполне подтверждается опытами и применяется для уничтожения или уменьшения намагничивания в стали и железе.

Наличие гистерезиса лишь немного изменяет форму кривой тока, почти не отражаясь на размагничивающем действии. На черт. (6) и (7) приведены для сравнения кривые, полученные опытным путем, при чем кривая магнитного потока строилась при помощи графического интегрирования кривой электродвижущей силы. На черт. (8) построены динамические петли гистерезиса для подобных случаев. Буквенные обозначения на этих чертежах одинаковы с черт. (4) и (5).

Если постепенно уменьшать приложенное переменное напряжение, то размагничивающее действие будет становиться все меньше и меньше, и при достижении напряжением значения нуля, магнитный поток достигнет своей максимальной величины. Эта точка, как оказывается, не будет находиться на начальной кривой намагничивания, а всегда лежит несколько выше ее. Для небольших значений напряжения магнитного поля, процентное увеличение индукции может достигать больших значений. Этим явлением пользуются для увеличения намагничивания магнитов в том случае, когда нельзя получить большого значения постоянных ампервитков. Объяснить такое повышение возможно тем, что при наличии переменного тока, магнитный поток переходит в некоторые моменты значение, соответствующее по кривой намагничивания постоянному току, и затем уже не возвращается по той же кривой, а идет всегда несколько выше ее. Это получается из-за того, что кривая намагничивания, вследствие гистерезиса, всегда лежит гораздо ближе к нижней части петли, переменный же ток уничтожает это влияние. На черт. (9) представлено такое повышение намагничивания под действиям постепенного приближения силы тока к некоторой точке, при все уменьшающихся отклонениях силы постоянного тока в ту и другую сторону.

Чем больше будет значение начальной амплитуды переменного тока, тем сильнее будет намагничивание при ее уменьшении до нуля. На черт. (10) приведен характер зависимости этого увеличения для стали и железа, из которых видно, что оно асимптотически приближается к некоторому предельному значению. Индукция, получаемая при этом, является идеальной, а кривая, соединяющая эти точки, будет идеальной кривой намагничивания. Для практического достижения идеальных значений для стали, переменный ток должен в начале иметь значительную амплитуду (дающую до 100% и больше от постоянных ампервитков), в то время как для железа достаточно очень малых амплитуд. Необходимые амплитуды находятся в связи со способностью материала сохранять остаточное намагничивание.

На черт. (11) даны зависимости, полученные опытным путем, между индукцией $B_0 = \frac{\Phi_0}{Q}$ и постоянными ампервитками $A W_0$, для различных значений напряженной и частоты переменного тока, а также основная начальная кривая намагничивания (А) и идеальная кривая (В). Кривые, для 198 вольт при 180 периодах и для 55 вольт при 50 периодах, почти совпадают, что является следствием одинаковых амплитуд магнитных потоков, т. к. из уравнения (4) следует

$$\Phi_m \cdot \left(W_2 \frac{\pi}{V \cdot 2} \right) = \frac{V}{c} = \frac{198}{180} = \frac{55}{50}$$

На чертеже (12) приведены магнитные проницаемости для идеальной и начальной кривой намагничивания. На черт. (13) даны зависимости процентных уменьшений магнитного потока $\frac{\Phi_0' - \Phi_0}{\Phi_0}$ от при-

ложенного напряжения, а на черт. (14) подобные же зависимости даны для кажущихся размагничивающих ампервитков $\frac{A W_0''}{A W_0}$.

Форма кривой напряжения очень мало влияет на размагничивающее действие. Острая кривая напряжения, соответствующая тупой кривой магнитного потока, дает несколько большее размагничивание, и наоборот, трапециoidalное напряжение—меньшее. На черт. (15) приведены кривые размагничивания для одинаковой величины напряжения, но разной формы. Кривая А относится к синусоидальной форме напряжения (коэффициент формы 1,11) а кривая В—трапециoidalной (коэффициент формы около 1,04). С—идеальная кривая намагничивания.

Если сердечник составлен из разных материалов или сечений, то общий характер всех явлений будет средним из таковых для отдельных частей, при чем влияние их будет тем больше, чем больше приходится на их долю ампервитков из общего числа. Наличие воздушных прослоек сильно сглаживает все явления.

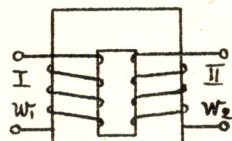
Практическое применение размагничивающего действия переменного тока возможно в очень разнообразных случаях. Для выяснения особенностей некоторых способов применения и определения степени их пригодности, в настоящее время производятся опыты, результаты которых будут в дальнейшем опубликованы.

При производстве опытов, для снятия кривых тока и напряжения применялись Ондограф Госпиталье и зеркальный осциллограф. Для измерений постоянных слагающих магнитного потока применялись баллистический гальванометр и флюксметр Грассо. Для того чтобы в обмотках постоянного тока не было переменного тока, имелось две одинаковых катушки, включаемых по схеме черт. 16 так, что электродвижущие силы в намагничивающих обмотках уничтожают друг друга. Вместо двух катушек возможно применять и одну, но с тремя сердечниками (черт. 18).

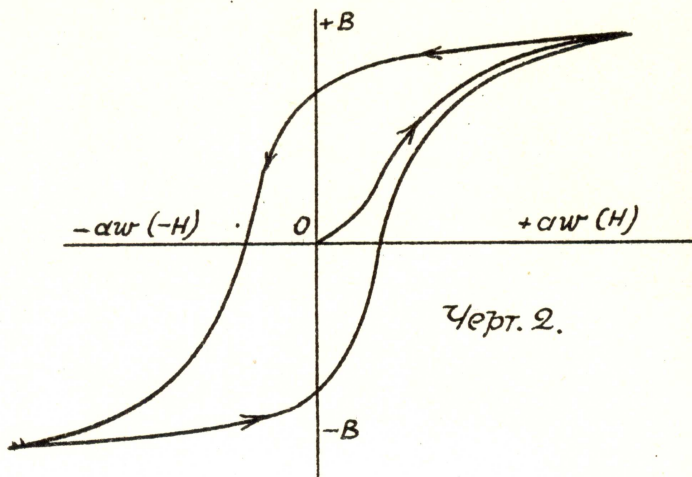
Для измерения электродвижущих сил, на сердечниках имелись еще по одной катушке с зажимами с и d. Последовательно с катушками в цепь переменного тока вставлялись омические сопротивления, к зажимам а и b которых приключались, для снятия кривых тока, ондограф или шлейфы осциллографа. Для снятия кривых напряжения такие же приключения делались к зажимам с и d.

Для снятия кривых намагничивания применялась почти такая же схема (черт. 17). В цепь постоянного тока включался переключатель, а в цепь переменного тока—потенциометр для плавного снижения напряжения до нуля. Флюксметр или баллистический гальванометр включался в две дополнительных катушки с таким расчетом, чтобы в него не проникал переменный ток. Баллистический гальванометр можно включать так же и в одну катушку, но тогда он должен иметь большую инерцию, т. к. иначе получается дрожжание рамки и зеркальца от проходящего через него переменного тока.

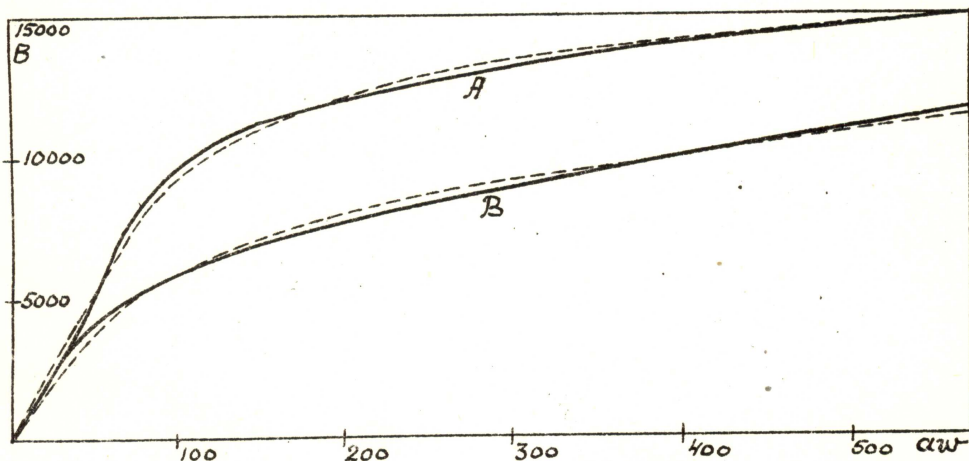
При измерении ординат идеальной кривой переменный ток постепенно доводился до нуля, а затем уже производилось переключение постоянного тока. После переключения получалась индукция не идеальная, а находящаяся на начальной кривой. Вследствие этого, вместо полуразности отсчетов по прибору, приходилось брать разность всего отсчета и полуразности отсчетов для начальной кривой, полученной при том же намагничивающем токе.



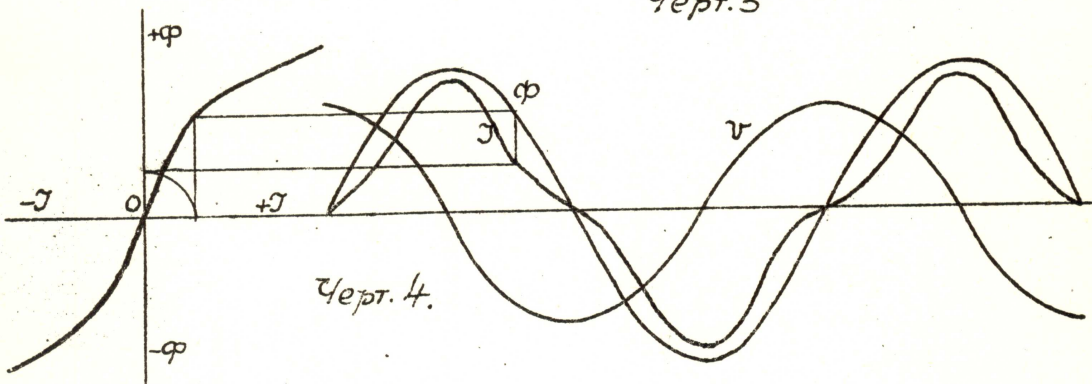
Черт. 1.



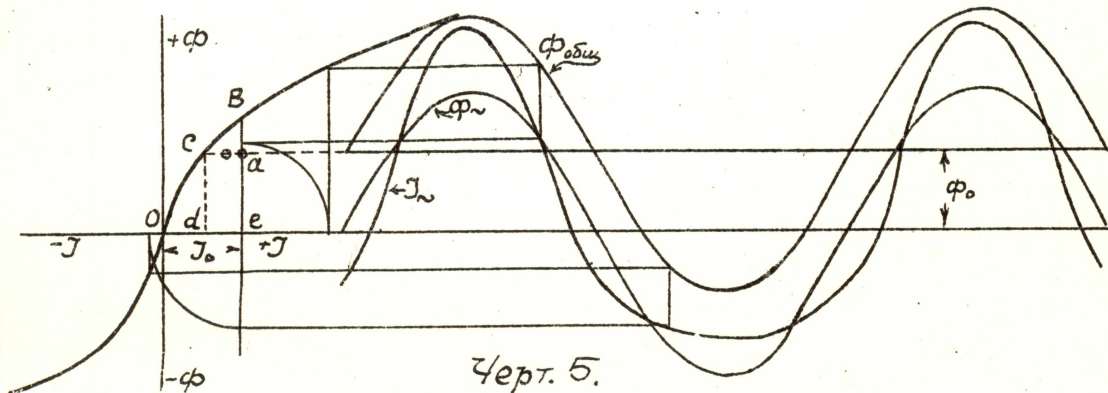
Черт. 2.



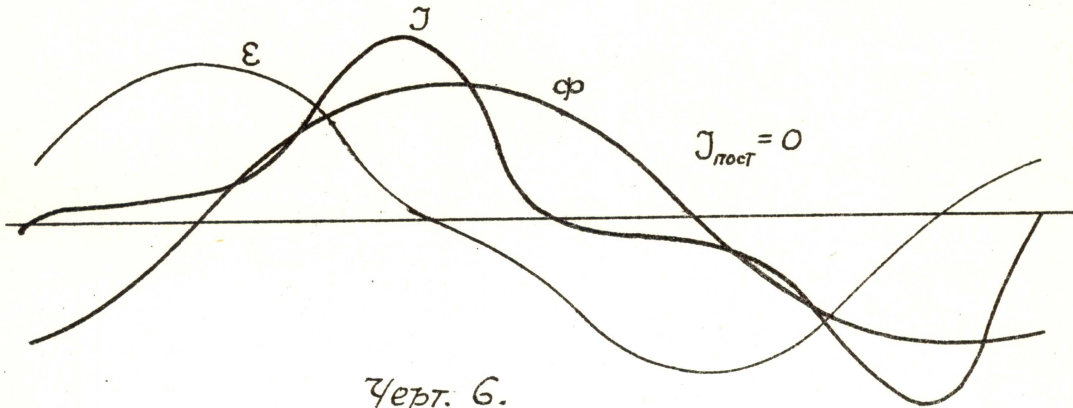
Черт. 3.



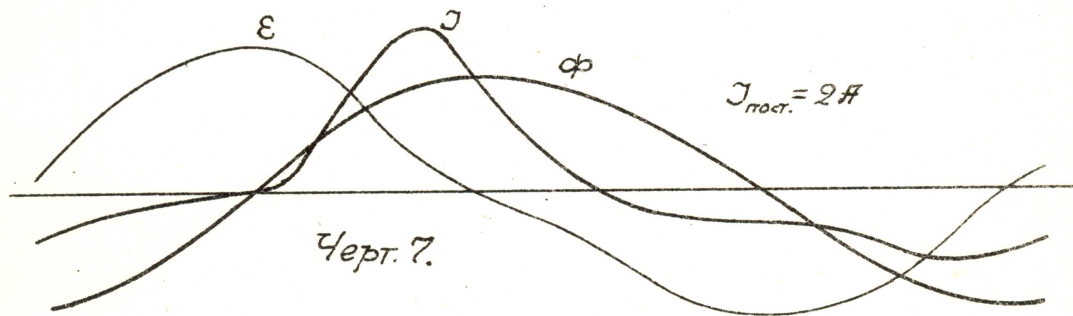
Черт. 4.



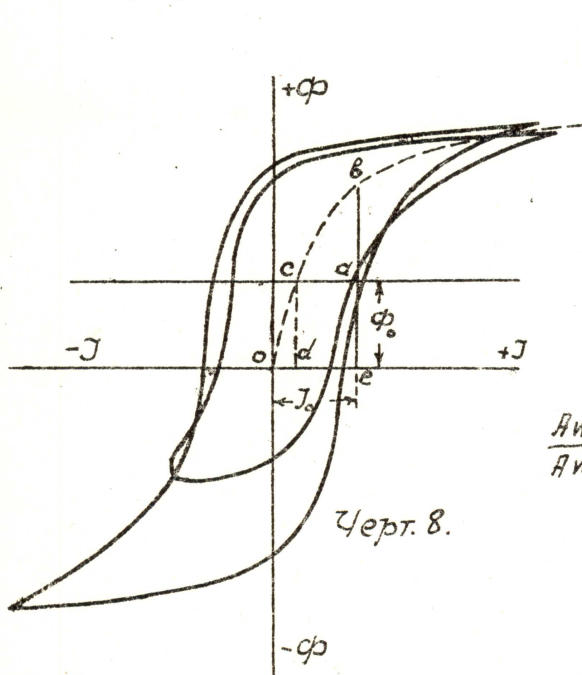
Черт. 5.



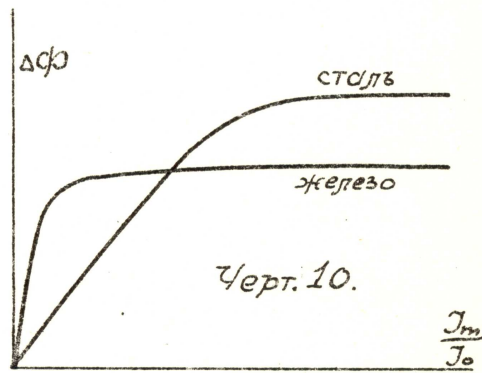
Черт. 6.



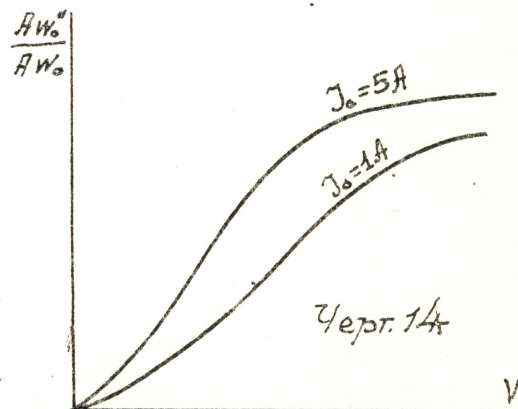
Черт. 7.



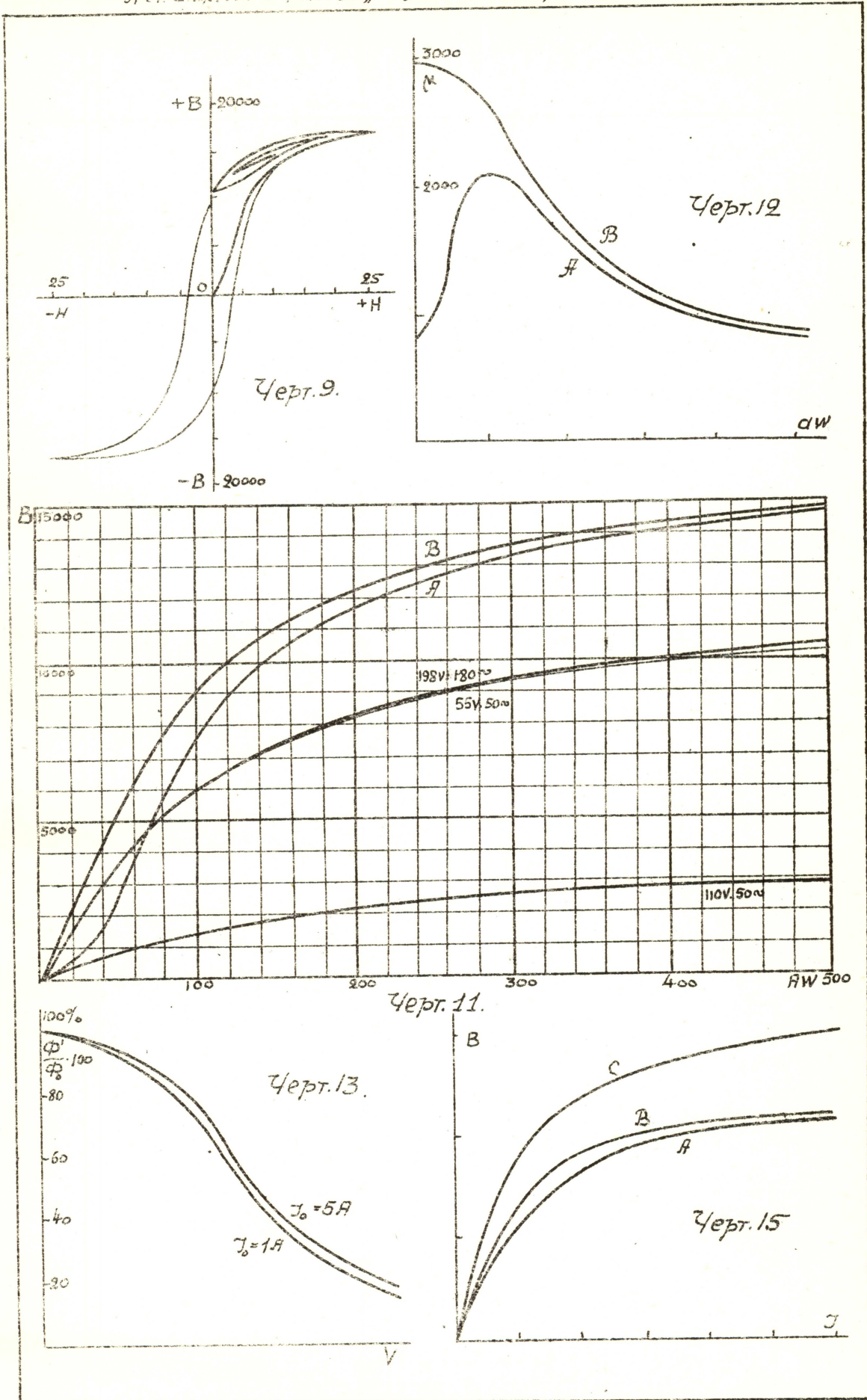
Черт. 8.



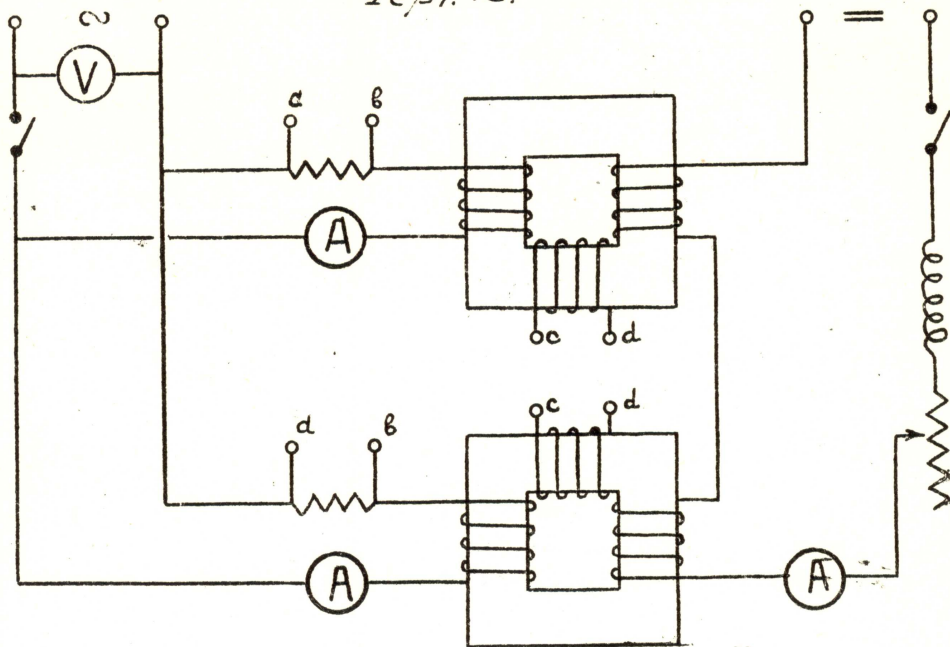
Черт. 10.



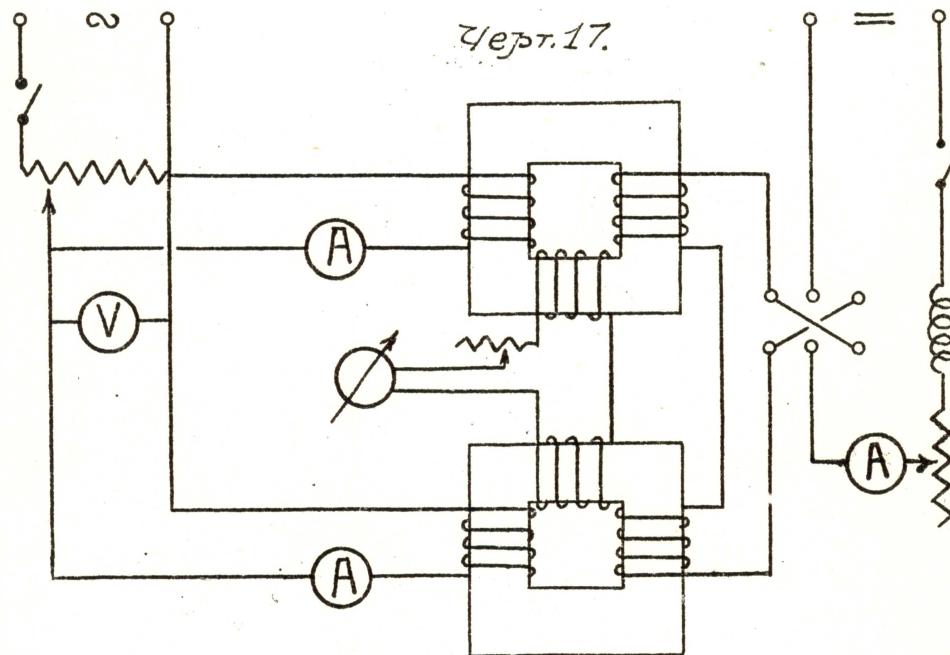
Черт. 14.



Черт. 16.



Черт. 17.



Черт. 18.

