

ROZDZIAŁ VIII.

Samoi indukcja.

Pole magnetyczne, wokół przewodników z prądem, ma wpływ na przebieg samego prądu. Wpływ ten nazywamy samoi indukcją.

Samoi indukcja powstaje tylko przy prądzie zmiennym, t. j. wtedy, gdy pole magnetyczne wokół prądu zmienia się. Zjawiska, zachodzące wtedy w obwodzie elektrycznym, dają się wyjaśnić przez powstanie w przewodniku siły elektromotorycznej samoi indukcji.

Najbardziej charakterystyczną własnością siły elektromotorycznej samoi indukcji jest jej kierunek, który, jak wiemy z doświadczenia, jest zawsze taki, że siła elektromotoryczna samoi indukcji przeciwdziała zmianom, zachodzącym w prądzie. Gdy prąd wzrasta, kierunek siły elektromotorycznej samoi indukcji jest odwrotny względem kierunku prądu. gdy natomiast prąd się zmniejsza, jest on zgodny z kierunkiem prądu.

Zjawisko samoi indukcji jest wypadkiem szczególnym indukcji prądów, zachodzącej pod wpływem zmian, w jakichkolwiek polach magnetycznych w okół przewodnika.

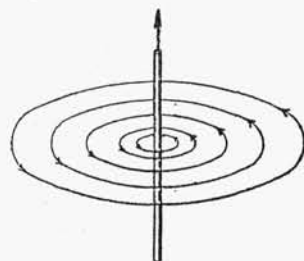
1. Pojęcia zasadnicze. Prawo indukcji prądów stwierdza, że wielkość siły elektromotorycznej indukcji w przewodniku wyraża się ilościowo strumieniem indukcji magnetycznej, przeciętym przez przewodnik w jednostce czasu.¹⁾

Określenie to jest zupełnie zrozumiałe, bez dokładniejszego wyjaśnienia, gdy przewodnik porusza się w polu magnetycznym. Tymczasem w zjawisku samoi indukcji mamy zwykle do czynienia z przewodnikiem nieruchomym. Dla uzmysłwienia więc znaczenia słów w powyższem prawie musimy sobie wyobrazić, że podczas zmiany prądu elektrycznego linie magnetyczne są w ruchu. Przy wzrastaniu prądu linie magnetyczne oddalają się od przewodnika, po którym płynie prąd, wywołujący te linie, a przy zmniejszaniu się

¹⁾ Patrz rozdział XXI „O przemianie pracy mechanicznej na pracę prądu” i rozdz. XXII „O powstaniu energii pola magnetycznego skutkiem pracy prądu”.

prądu linie zbliżają się do tego przewodnika. Można nawet wyobrazić sobie, że przy powstaniu prądu linie magnetyczne wyłaniają się z przewodnika, a przy znikaniu prądu przewodnik pochłania te linie.

Rozważając kawałek przewodnika, stanowiącego część obwodu zamkniętego (rys. 66), można sobie wyobrazić, że linie magnetyczne, powstają i znikają przy zmianach natężenia prądu i, przecinając przewodnik, wywołują tym sposobem odpowiednią siłę elektromotoryczną samoindukcji. Gdy mamy długi prosty przewódnik,¹⁾ po którym płynie prąd zmienny, to siłę elektromotoryczną samoindukcji wywoływać będą w danym kawałku przewodnika tylko te linie, które w nim powstały. Gdybyśmy jednak drut zwinęli tak, jak to widzimy na rys. 67, znaczna liczba linii magnetycznych, wywołanych przez pewien zwoj, przecięta by też inne zwoje i siła elektromotoryczna wypadkowa byłaby większa, niż poprzednio. Tę wypadkową siłę elektromotoryczną również nazywamy siłą elektromotoryczną samoindukcji.

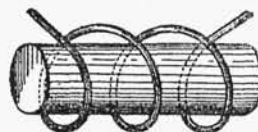


Rys. 66.

Przez umieszczenie wewnątrz zwojnicy rdzenia żelaznego (rys. 68), możemy jeszcze bardziej zwiększyć siłę elektromotoryczną samoindukcji. Strumień magnetyczny, powstający wewnątrz zwojnicy, przy tem samym natężeniu, co poprzednio, będzie teraz większy wobec tego, że żelazo ma wielką przenikalność magnetyczną.



Rys. 67.

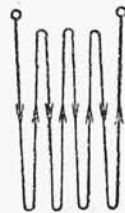


Rys. 68.

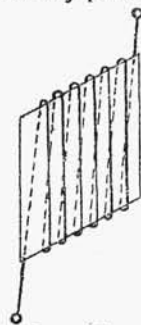
Chcąc osłabić siłę elektromotoryczną samoindukcji w przewodniku, należy zmniejszyć, o ile tylko można, strumień magnetyczny, wywołany przez prąd. W tym celu przewódnik, prowadzący prąd, można złożyć [w]e dwoje, jak to wskazano na rys. 69. Nazewnierz takiej pętlicy strumienie magnetyczne od obu jej gałęzi bez mała znoszą się wzajemnie; zniósłby się one zupełnie, gdyby obie gałęzie mogły zająć w przestrzeni ściśle jedno i to samo miejsce.



Rys. 69.



Rys. 70.



Rys. 71.

¹⁾ Zakładamy, że inne części obwodu zamkniętego, którego część stanowi rozważany przewódnik, znajdują się w znacznej odległości od rozważanej części przewodnika.

Gdy drut długi złożymy we dwoje i zwiniemy go w kształcie zwojnicy, zwiemy taką zwojnicę zwiniętą bifilarnie. Można także ułożyć długi drut zygakiem, jak to wskazano na rys. 70, lub też nawinać na bardzo cienką płytkę materiału izolacyjnego (rys. 71); w tych wszystkich wypadkach samoindukcja będzie bardzo mała.

2. Wzór ogólny współczynnika samoindukcji. Ponieważ zjawisko samoindukcji jest wypadkiem szczególnym indukcji prądów, wzory, dotyczące zjawiska samoindukcji, wyprowadzamy ze wzoru dla indukcji prądów, podanego dalej w rozdziale XXI. W tym celu zastosujemy wzór, wyrażający siłę elektromotoryczną indukcji w obwodzie, obejmującym zmienny strumień indukcji magnetycznej. W rozdziale XXI wyprowadzono, że

gdy strumień indukcji Φ_t , objęty przez pewien obwód elektryczny w chwili t , zmienia się o $d\Phi_t$ w czasie dt , to w obwodzie tym powstaje w chwili t siła elektromotoryczna indukcji, wyrażona wzorem:

$$E_t = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Wzór ten wyraża np. siłę elektromotoryczną indukcji, powstającą w pierścieniu (rys. 72), obejmującym wiązkę linii magnetycznych, które przedstawiają obrazowo strumień magnetyczny.

Gdy obwód elektryczny obejmuje pewien strumień wielokrotnie (rys. 73), to w każdym zwoju powstaje siła elektromotoryczna, wyrażona powyższem równaniem.

Wszystkie te siły elektromotoryczne skierowane są w drucie w jedną stronę, a więc dodają się arytmetycznie. Cała siła elektromotoryczna indukcji, powstająca w takim obwodzie, zależy od liczby zwojów, obejmujących strumień.

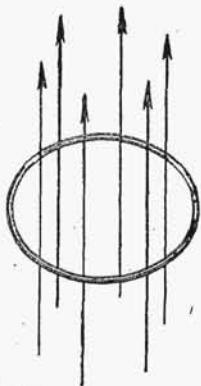
Oznaczmy liczbę tych zwojów przez γ , a strumień magnetyczny, objęty w chwili t każdym zwojem, przez Φ_t . Gdy strumień ten w czasie dt zmienia się o $d\Phi_t$, całą siłę elektromotoryczną, powstającą w rozważanym obwodzie, wyrażamy wzorem:

$$E_t = - \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot \gamma$$

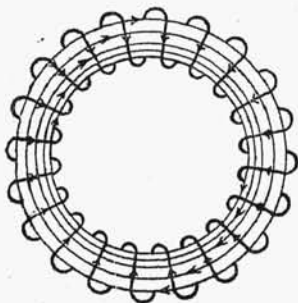
Znak minus określa tu kierunek siły elektromotorycznej indukcji. Gdy $d\Phi_t$ jest dodatnie, a więc strumień indukcji magnetycznej *w z r a s t a*, kierunek siły elektromotorycznej jest *p r z e-*

ciwny kierunkowi prądu, który według prawidła śruby wywołałby objęty obwodem strumień magnetyczny. Gdy zaś $d\Phi_t$ jest ujemne — strumień indukcji magnetycznej *z m n i e j s z a* się, wtedy kierunek siły elektromotorycznej indukcji jest *z g o d n y* z kierunkiem powyższego prądu.¹⁾

¹⁾ Wynika to z wywodów podanych w rozdziale XXI.



Rys. 72.



Rys. 73.

Jeżeli strumień magnetyczny Φ_t w powyższych przykładach został wywołany przez prąd, płynący w tym obwodzie, gdzie rozważamy siłę elektromotoryczną indukcji, to mamy tu do czynienia z samoindukcją. Siłę elektromotoryczną samoindukcji oznaczać będziemy przez E_L .

Rozważmy przykład najprostszy (rys. 72). Siła elektromotoryczna samoindukcji wyraża się tu wzorem:

$$E_{Lt} = - \frac{d\Phi_t}{dt}.$$

Założmy, że w pierścieniu w chwili t płynie prąd i_t . Strumień magnetyczny, wywołany przez prąd jest proporcjonalny do natężenia prądu, a współczynnik proporcjonalności jest stały, o ile przenikalność magnetyczna ośrodka ma wartość stałą. Oznaczmy ten współczynnik przez L , wtedy mamy:

$$\Phi_t = L \cdot i_t,$$

a więc:

$$d\Phi_t = d(L \cdot i_t)$$

i:

$$E_{Lt} = - \frac{d(L \cdot i_t)}{dt}.$$

Gdy L ma wartość stałą, niezależną od i , wtedy:

$$E_{Lt} = - L \cdot \frac{di_t}{dt}.$$

W drugim przypadku, gdy mamy zwojnicę (rys. 73), składającą się z γ zwojów, obejmujących strumień Φ_t ,¹⁾ wzory dla siły elektromotorycznej samoindukcji będą nieco inne:

$$E_{Lt} = - \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot \gamma.$$

Ponieważ γ jest wielkością stałą, możemy napisać:

$$E_{Lt} = - \frac{d(\gamma \cdot \Phi_t)}{dt}.$$

Oznaczmy przez L' współczynnik, przez który należy pomnożyć natężenie prądu, aby otrzymać wyraz $\gamma\Phi_t$, a więc:

$$L' = \frac{\gamma \cdot \Phi_t}{i_t}, \dots \dots \dots (1)$$

albo

$$\gamma\Phi_t = L' \cdot i_t$$

$$d(\gamma\Phi_t) = d(L' \cdot i_t),$$

wtedy:

$$E_{Lt} = - \frac{d(L' \cdot i_t)}{dt} \dots \dots \dots (2)$$

Gdy L' jest wielkością stałą, niezależną od i_t , wtedy:

$$E_{Lt} = - L' \frac{di_t}{dt} \dots \dots \dots (3)$$

¹⁾ Gdy prąd przebiega w takiej zwojnicy, zjawiają się jeszcze strugi magnetyczne, które obejmują tylko po jednym lub po kilka zwojów; strugi te tu pomijamy.

Wielkości L i L' nazywamy współczynnikami samoindukcji albo krócej indukcyjnością odpowiednich obwodów.

Wzór (1) dla L' jest ogólniejszy, według niego więc określimy pojęcie indukcyjności pewnego obwodu jako: stosunek strumienia magnetycznego pomnożonego przez liczbę zwojów obwodu elektrycznego, obejmującego ten strumień, do natężenia prądu elektrycznego, który ten strumień wywołał.

Jeżeli założymy, że w pewnym obwodzie elektrycznym przepływa prąd, którego natężenie równa się jednostce, to liczbowo indukcyjność tego obwodu równa się strumieniowi magnetycznemu, wywołanemu przez ten prąd, pomnożonemu przez liczbę zwojów, które ten strumień obejmują.

Uzmysławiając sobie strumień magnetyczny jako liczbę linii magnetycznych, możemy liczbę, wyrażającą indukcyjność ująć jako liczbę skojarzeń linii magnetycznych przy prądzie równym jednostce ze zwojami przewodnika. Np. gdy dwie linie magnetyczne są objęte przez dwa zwoje drutu, to mamy cztery skojarzenia, więc indukcyjność wynosi cztery jednostki bezwzględne elektromagnetyczne.

Gdy prąd i strumień wyrażone są w bezwzględnych jednostkach elektromagnetycznych, to i wartość indukcyjności wyrazi się w tych samych jednostkach. Praktyczna jednostka indukcyjności, odpowiadająca woltom i amperom, nosi nazwę henr. Jeden henr równa się 10^9 bezwzględnych jednostek elektromagnetycznych.¹⁾

Uwzględniając wzór dla obwodu magnetycznego w paragrafie 4 rozdziału VII str. 64, możemy wyrazić indukcyjność inaczej.

Zależność strumienia magnetycznego od natężenia prądu w zwojnicy wyraża się według rozdziału VII wzorem:

$$\Phi_t = \frac{1,256 \cdot \tilde{\gamma} \cdot i_t}{\int_0 \frac{dl}{s \cdot \mu}}$$

Założmy, że i wprowadzamy w bezwzględnych jednostkach elektromagnetycznych i oporność magnetyczną oznaczamy przez R , wtedy będzie:

$$\Phi_t = \frac{12,56 \cdot \tilde{\gamma} \cdot i_t}{R},$$

lub inaczej:

$$\Phi = \frac{4 \pi \cdot \tilde{\gamma} \cdot i_t}{R}.$$

¹⁾ Patrz dowodzenie w rozdziale XXX.

Mając na względzie wzór (1), otrzymamy :

$$L' = \frac{4 \pi \cdot z^2}{R} \quad (4)$$

Wzór ten wskazuje, że indukcyjność jest wprost proporcjonalna do drugiej potęgi liczby zwojów zwojnicy i odwrotnie proporcjonalna do oporności magnetycznej obwodu strumienia, wywołującego samoindukcję.

O ile oporność jest stała, np. gdy strumień magnetyczny przebiega całkowicie w powietrzu, to i indukcyjność jest stała.

Gdy obwód magnetyczny składa się z powietrza i żelaza, indukcyjność również często można uważać za stałą. Oporność magnetyczna jest odwrotnie proporcjonalna do przenikalności magnetycznej ośrodka, więc nawet przy jednakowej długości średniej linii strumienia w powietrzu i w żelazie, w normalnych warunkach magnesowania, stała oporność magnetyczna powietrza jest tysiące razy większa od zmiennej oporności żelaza.¹⁾

Wogóle obwód elektryczny może obejmować kilka różnych strumieni magnetycznych, zawsze jednak dla dowolnego obwodu elektrycznego w sposób podobny, jak poprzednio, możemy znaleźć indukcyjność, która daje możność wyrażenia siły elektromotorycznej samoindukcji wzorem (2) lub (3).

Indukcyjność, jak to widzimy ze wzoru (4), zależy od postaci geometrycznej obwodu elektrycznego i od własności magnetycznych otaczającego ośrodka; współczynnik ten wyraża magnetyczne własności obwodu elektrycznego.

W praktyce stosujemy nieraz współczynniki samoindukcji nie tylko dla całych obwodów, lecz i dla części tych obwodów. Wtedy w podanym wyżej określeniu indukcyjności mamy na myśli strumień magnetyczny, który wywołuje tylko rozważana część obwodu, gdy w niej płynie prąd elektryczny.

3. Indukcyjność zwojnicy pierścieniowej. Rozważymy zwojnicę (rys. 51), która ma z zwojów i jest nawinięta na pierścieniu o przekroju poprzecznym $s \text{ cm}^2$. Długość średniej linii strumienia magnetycznego oznaczmy przez l , a przenikalność magnetyczną materiału, z którego zrobiony jest pierścień przez μ . Oporność obwodu magnetycznego wyrażamy tu wzorem przybliżonym :

$$R = \frac{l}{s \cdot \mu} .$$

¹⁾ Pamiętać jednak należy, że rozumowanie tego rodzaju jest słuszne tylko wtedy, gdy współczynnik samoindukcji stosujemy do takich zmian prądu elektrycznego, przy których stan magnetyczny żelaza zmienia się nie wiele.

Zatem według wzoru (4):

$$L = \frac{4 \pi \cdot \gamma^2}{l} \cdot s \cdot \mu.$$

4. Indukcyjność zwojnicy długiej i cienkiej. Mając zwojnicę cienką i długą (rys. 74), możemy przyjąć w przybliżeniu, że wszystkie



Rys. 74.

zwoje obejmują ten sam strumień magnetyczny i że oporność części obwodu magnetycznego zewnątrz zwojnicy jest bardzo mała w porównaniu do oporności części obwodu magnetycznego wewnątrz zwojnicy.

Oznaczamy długość zwojnicy przez l , przekrój poprzeczny przez s , a przenikalność magnetyczną ośrodka przez μ . Wtedy oporność magnetyczna będzie:

$$R = \frac{l}{s \cdot \mu},$$

a więc wyraz dla indukcyjności otrzymamy według wzoru (4) następujący:

$$L = \frac{4 \pi \cdot \gamma^2}{l} \cdot s \cdot \mu.$$

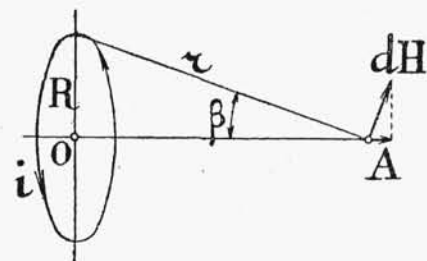
Możemy drogą rozumowania przekonać się, że zrobione powyżej przypuszczenia są zgodne z wynikami wywodów ścisłych, które w dalszym ciągu przytaczam.

Przedewszystkiem wyprowadzimy wzór dla natężenia pola w punkcie A , znajdującym się na osi przewodnika kołowego o promieniu R (rys. 75), po którym przepływa prąd i . Każda cząstka dl obwodu koła wytwarza w punkcie A natężenie pola.¹⁾

$$dH = \frac{dl \cdot i}{r^2} \cdot \sin \alpha.$$

r — jest to odległość punktu A od obwodu koła, a α — kąt pomiędzy kierunkiem prądu a linią r ; kąt ten $= 90^\circ$, przeto:

$$dH = \frac{dl \cdot i}{r^2}.$$



Rys. 75.

Natężenie pola, wypadkowe od całego prądu kołowego, jest skierowane wzdłuż linii OA , ponieważ rzuty natężenia pola od prądu w poszczególnych cząstkach obwodu koła na kierunku prostopadły do OA znoszą się nawzajem.

¹⁾ Patrz rozdział I.

Długość dx można wyrazić przez łuk, odpowiadający $< d\beta$, zakreślony z punktu A promieniem $AB=r$. Długość tego łuku będzie:

$$r \cdot d\beta.$$

Z rys. 77 widzimy, że

$$dx = \frac{r \cdot d\beta}{\sin \beta},$$

a uwzględniając, że średnica zwojnicy $= 2R$:

$$R = r \cdot \sin \beta.$$

Przez podstawienie ostatnich wyrazów we wzór (7), otrzymamy:

$$H = \int_{\beta_1}^{180^\circ - \beta_2} 2 \pi j \cdot \sin \beta \cdot d\beta,$$

lub po zcałkowaniu: $H = 2 \pi \cdot j \cdot \left[-\cos \beta \right]_{\beta_1}^{180^\circ - \beta_2},$

lub też: $H = 2 \pi \cdot j \cdot (\cos \beta_1 + \cos \beta_2).$

Ze wzoru (6) mamy:

$$j = \frac{\gamma \cdot i}{l},$$

przeto:

$$H = \frac{2 \pi \cdot \gamma i}{l} (\cos \beta_1 + \cos \beta_2).$$

Gdy zwojnica jest bardzo długa w porównaniu do średnicy, natężenie pola w pobliżu środka znajdziemy, zakładając $\beta_1 = \beta_2 = 0$. $\cos 0^\circ = 1$; w tych zatem warunkach:

$$H = \frac{4 \pi \cdot \gamma i}{l} \cdot 1)$$

Przyjmując, że natężenie pola mało się zmienia przy przesuwaniu wzdłuż i wpoprzek zwojnicy długiej a cienkiej i oznaczając przez s pole przekroju poprzecznego takiej zwojnicy, strumień indukcji magnetycznej wewnątrz zwojnicy będzie:

$$\Phi = \mu H \cdot s = \frac{4 \pi \cdot \gamma i}{l} \cdot s \cdot \mu.$$

A mnożąc przez liczbę zwojów otrzymamy:

$$\Phi \cdot \gamma = \frac{4 \pi \cdot \gamma^2 \cdot i}{l} \cdot s \mu.$$

Indukcyjność równa się liczbowo temu wyrazowi przy prądzie równym jednostce, zatem:

$$L = \frac{4 \pi \cdot \gamma^2}{l} \cdot s \mu \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (8)$$

¹⁾ Gdy $l = 20 R$, na osi zwojnicy, pomiędzy punktami, odległymi od końców na $\frac{1}{16} l$, H zmienia się mniej niż o 1%, a pomiędzy punktami odległymi od końców o $\frac{1}{6} l$ mniej niż o 0,1% (według W. Webera).

Jest to wzór przybliżony; w rzeczywistości indukcyjność jest mniejsza, ponieważ nie wszystkie zwoje obejmują cały strumień.

5. Przykłady obliczenia indukcyjności. I. Długa, cienka zwojnica (rys. 74) składa się z 1000 zwojów w jednej warstwie, długość jej wynosi 100 cm a średnica każdego zwoju 3 cm. Zwojnica jest nawinięta na rdzeniu drewnianym.

Przy tych założeniach wartość poszczególnych wielkości we wzorze (8) jest następująca: $\tau = 1000$, $l = 100$ cm, $s = \frac{\pi \cdot 3^2}{4} = 7,069$ cm², $\mu = 1$. Podstawiając te liczby otrzymamy:

$$L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 1000^2}{100} 7,069 = 887500 \text{ c. g. s.}$$

Ponieważ jeden henr = 10⁹ c. g. s., przeto:

$$L = 0,0008875 \text{ henra.}$$

II. Stan magnetyczny elektromagnesu, przedstawionego na rys. 61, jest określony przez liczby podane w przykładzie, przytoczonym w rozdziale VII § 10. Obliczyć należy indukcyjność dla zwojnicy magnesującej, zakładając, że składa się ona 1000 zwojów.

Obliczenie możemy przeprowadzić w sposób dwojaki.

Chcąc otrzymać wyniki dość dokładne dla celów praktycznych, możemy założyć, że samoindukcję wywołuje tylko strumień główny. Wtedy, stosując dla obliczenia indukcyjności wzór (4) niniejszego rozdziału, obliczymy przedewszystkiem oporność magnetyczną obwodu strumienia głównego (rys. 62). Stosować będziemy oznaczenia i liczby przyjęte w przykładzie, rozważonym w rozdziale VII, § 10:

$$R = \frac{l_1}{\mu_1 \cdot \frac{s_1}{\sigma}} + \frac{2 \sigma}{s_3} + \frac{l_2}{\mu_2 \cdot s_2}$$

Wartość współczynników μ_1 i μ_2 zależy od indukcji i gatunku materiału. Z obliczeń w przykładzie, podanym w paragrafie 10 rozdziału VII, wynika, że indukcja w podkowie wynosi 10000, a w kotwicy 5000.

Przypuśćmy, że mamy tu do czynienia z żelazem kutem, możemy wówczas skorzystać z krzywej μ , podanej na rys. 34. Zestawiając krzywe (rys. 33 i 34), widzimy, że indukcji magnetycznej 10000 odpowiada $\mu_1 = 2700$, a indukcji 5000..... $\mu_2 = 3300$.

Podstawiając zatem wartość liczbową wielkości poszczególnych we wzór powyższy, otrzymamy:

$$\begin{aligned} R &= \frac{60}{2700 \cdot \frac{100}{1,1}} + \frac{2 \cdot 0,2}{100} + \frac{40}{3300 \cdot 200} = \\ &= 0,000245 + 0,004 + 0,000061 = 0,004306. \end{aligned}$$

A więc:

$$L = \frac{4\pi \chi^2}{R} = \frac{4\pi \cdot 1000^2}{0,004306} = 2915 \cdot 10^6 \text{ c. g. s.},$$

albo:

$$L = 2915 \cdot 10^6 \cdot 10^{-9} = 2,92 \text{ henra.}$$

Można przeprowadzić obliczenie, unikając wprowadzania wielkości μ . Według powyższej teorii, indukcyjność równa się ilościowo strumieniowi magnetycznemu, który odpowiada jednostce prądu, wziętemu tylokrotnie, ile zwojów obwodu elektrycznego obejmuje ten strumień.

Posiłkując się tym określeniem, postępujemy w sposób następujący:

Z danych przykładu, obliczonego w § 11 rozdziału VII widzimy, że strumień magnetyczny wynosi 10^6 c. g. s., a z obliczeń tam przeprowadzonych wynika, że strumień ten powstaje pod wpływem 3688 ampero-zwojów. Gdy zwojnica ma 1000 zwojów, prąd w drutach zwojnicy wynosi:

$$\frac{3688}{1000} = 3,688 \text{ ampera} = 0,3688 \text{ c. g. s.}$$

Przeto w bezwzględnych jednostkach elektromagnet., otrzymamy:

$$L = \frac{10^6 \cdot 1000}{0,3688} = 2,71 \cdot 10^9 \text{ c. g. s.}$$

A więc w powyższych warunkach indukcyjność zwojnicy magnesującej wynosi 2,71 henra.

Różnica w wynikach, przytoczonych wyżej dwu obliczeń, pochodzi od pewnej dowolności w wyborze współczynnika μ .

Ze względu na zmienność współczynnika μ w zależności od natężenia prądu magnesującego, wyznaczona tu indukcyjność może być zastosowaną tylko przy małych zmianach natężenia prądu.
