

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
BIBLIOTEKA NAUKOWA

Nr _____

PRACE
INSTYTUTU ŁĄCZNOŚCI

ROK XVIII

ZESZYT 3(63)

WARSZAWA

WYDAWNICTWA KOMUNIKACJI I ŁĄCZNOŚCI

SPIS TREŚCI

Kazimierz Kassenberg — Obliczanie elektromagnesowych układów napędowych . . . 3

СОДЕРЖАНИЕ

K. Kassenberg — Расчёт устройств электромагнитного привода . . . 3

CONTENTS

K. Kassenberg — Calculation of electromagnet driving devices . . . 3

SOMMAIRE

K. Kassenberg — Calcul des dispositifs de propulsion par électro-aimant . . . 3

INHALTSVERZEICHNIS

K. Kassenberg — Berechnung der elektromagnetischen Antriebssysteme . . . 3

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

PRACE
INSTYTUTU ŁĄCZNOŚCI

ROK XVIII

ZESZYT 3(63)

WARSZAWA

WYDAWNICTWA KOMUNIKACJI i ŁĄCZNOŚCI

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny — *prof. mgr inż. Lesław Kędziński*

Redaktorzy działów:

adj. mgr inż. Aleksy Brodowski, doc. mgr inż. Jerzy Wójcikiewicz
Sekretarz Redakcji — *Janina Janicka*

Adres Redakcji:

Instytut Łączności, Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

Printed in Poland

Opracowano w Dziale Wydawniczym Instytutu Łączności

KAZIMIERZ KASSENBERG

621.318.56.001.2

OBLICZANIE ELEKTROMAGNESOWYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH

Rękopis dostarczono do Komitetu Redakcyjnego dnia 20.VI.1970 r.

W wielu urządzeniach z dziedziny telekomutacji, automatyki i innych, gdzie zachodzi potrzeba wywoływania ruchu i wykonywania niewielkich prac mechanicznych (do 500 Gcm), korzystne jest stosowanie elektromagnesowych napędów ruchu.

Za taką formą napędu przemawiają: prostota konstrukcji, elastyczność lokalizacji, niewrażliwość na zakłócenia, stałość montażu.

Autor podaje szczegółową obliczeniową metodę ustalania parametrów napędu elektromagnesowego i sprawdza słuszność tej metody na przykładzie obliczeń kilku typów przekaźników stosowanych dotychczas w telekomutacji.

ZNACZENIE SYMBOLI

- A — praca wykonana przez układ napędowy podczas całego ruchu kotwicy, w Gcm
- A_0 — praca końcowa kotwicy, w Gcm
- A_p — praca początkowa kotwicy, w Gcm
- AZ — amperozwoje dostarczone przez uzwojenie (określenie ogólne)
- AZ_{max} — maksymalna wartość amperozwojów (przy nie przyciągniętej kotwicy)
- AZ'_{max} — maksymalna wartość amperozwojów przy przyciągniętej kotwicy
- AZ_0 — amperozwoje zwalniania kotwicy, odpowiadające strumieniowi Φ_{r0}
- AZ_p — amperozwoje przyciągania kotwicy, odpowiadające strumieniowi Φ_{rp}
- AZ_u — ustalona wartość amperozwojów
- a — wcięcie w kotwicy, w cm (rys. 11, rys. 12)
- B_a — indukcja w punkcie A , w Gs (rys. 11)
- B_n — indukcja nasycenia materiału kotwicy, w Gs
- B_{r0} — indukcja w rdzeniu przy strumieniu roboczym równym strumieniowi Φ_{r0} , w Gs
- b — szerokość ramienia jarzma lub rdzenia kotwicy, w cm (rys. 11, rys. 12)

- $2.b$ — szerokość rdzenia, w cm (rys. 11, rys. 12)
 c — długość odcinka nasycenia, w cm (rys. 11)
 D_r — średnica rdzenia, w cm (rys. 14)
 D_{re} — ekwiwalentna średnica rdzenia przy przekroju prostokątnym, w cm
 d — długość kotwicy, w cm (rys. 11, rys. 12)
 d_r — średnica drutu nawojowego, w mm
 e — podstawa logarytmów naturalnych
 F_0 — potrzebna siła przyciągająca kotwicę w położeniu pracy, w G
 F_p — potrzebna siła przyciągająca kotwicę w położeniu spoczynkowym, w G
 F_r — przejściowa wartość siły przyciągającej kotwicę, w G
 F_1 — siła odciągająca napędzanego układu sprężyn (mechanizmu) w pozycji spoczynkowej, w G
 F_2 — siła odciągająca napędzanego układu sprężyn (mechanizmu) w pozycji pracy, w G
 G — przewodność uzwojenia, w S
 G_u — sprawdzona przewodność uzwojenia, w S (wzór 10)
 G_{un} — maksymalna przewodność miejsca przeznaczanego na uzwojenia ($k_w = 1$), w S
 H_k — siła powściągająca materiału obwodu magnetycznego, w Oe
 H_{ro} — natężenie pola magnetycznego potrzebne do wywołania indukcji B_{ro} , w Oe
 h — potrzebny ruch dla prawidłowej pracy napędzanego układu sprężyn (mechanizmu), w cm
 h_u — wysokość miejsca przeznaczanego na uzwojenie lub maksymalna wysokość uzwojenia, w cm
 h_j — wysokość jarzma, w cm
 I — ustalona wartość natężenia prądu, w A
 i — chwilowa wartość natężenia prądu, w A
 k_c — stosunek stałych czasowych przy przyciągniętej i nie przyciągniętej kotwicy
 k_f — stosunek strumienia zwalniania do strumienia przyciągania
 k_r — współczynnik oporności magnetycznej obwodu strumienia magnetycznego, w Gcm^{-2}
 k_{rmin} — minimalny współczynnik oporności magnetycznej obwodu strumienia magnetycznego, w Gcm^{-2}
 k_n — współczynnik oporności obwodu strumienia rozproszenia
 k_σ — współczynnik oporności szczelin powietrznych
 k_s — współczynnik wzrostu strumienia roboczego przy przejściu kotwicy z jednej krańcowej pozycji w drugą przy stałych amperozwojach
 k_{smin} — minimalny współczynnik wzrostu oporności obwodu strumienia roboczego przy przejściu kotwicy z jednej krańcowej pozycji w drugą przy stałych amperozwojach

- $k_{s\max}$ — maksymalny współczynnik wzrostu oporności obwodu strumienia roboczego przy przejściu kotwicy z jednej krańcowej pozycji w drugą przy stałych amperozwojach
- k_w — współczynnik wypełnienia drutu nawojowego
- L — indukcyjność uzwojenia (oznaczenie ogólne), w H
- L_r — indukcyjność uzwojenia w odniesieniu do strumienia roboczego, w H
- L_n — indukcyjność uzwojenia w odniesieniu do strumienia rozproszenia, w H
- L^s_r — długość średniego zwoju, w cm
- l_s — długość linii sił w obwodzie magnetycznym, w cm (rys. 12, rys. 14)
- l_r — długość rdzenia, w cm (rys. 12, rys. 14)
- l_n — długość miejsca przeznaczonego na uzwojenia lub maksymalna długość uzwojenia, w cm (rys. 12, rys. 14)
- M — oznaczenie wzoru (191)
- m — stosunek boków prostokątnego przekroju rdzenia
- N — oznaczenie wzoru (192)
- n — stosunek długości kotwicy do szerokości ramienia jarzma
- P — moc tracona w uzwojeniu, w W
- P_u — ustalona wartość mocy traconej w uzwojeniu, w W
- P_{max} — dopuszczalna moc tracona w uzwojeniu, w W
- p — współczynnik wpływu strumienia roboczego na oporność jego obwodu (wzór 186)
- p_{ch} — dopuszczalna moc przypadająca na cm^2 powierzchni chłodzenia
- R — oporność uzwojenia, w omach
- R_μ — oporność magnetyczna obwodu strumienia roboczego (oznaczenie ogólne), w cm^{-1}
- $R'_{\mu k}$ — oporność obwodu strumienia roboczego przy strumieniu szczytkowym przy przyciągniętej kotwicy, w cm^{-1}
- $R'_{\mu k\min}$ — minimalna oporność obwodu strumienia roboczego przy strumieniu szczytkowym przy przyciągniętej kotwicy, w cm^{-1}
- $R_{\mu l}$ — ekwiwalentna oporność szczelin powietrznych poza szczeliną kotwica-rdzeń sprowadzona do przekroju rdzenia, w cm^{-1}
- $R_{\mu\max}$ — maksymalna oporność obwodu strumienia roboczego przy nie przyciągniętej kotwicy, w cm^{-1}
- $R_{\mu^* \max}$ — maksymalna oporność obwodu strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy, w cm^{-1}
- $R_{\mu s\max}$ — maksymalna oporność zależnej szczeliny powietrznej przy nie przyciągniętej kotwicy, w cm^{-1}
- $R'_{\mu s\max}$ — maksymalna oporność zależnej szczeliny powietrznej przy przyciągniętej kotwicy, w cm^{-1}
- $R_{\mu n}$ — oporność magnetyczna obwodu strumienia rozproszenia, w cm^{-1}
- $R_{\mu p}$ — oporność magnetyczna obwodu strumienia roboczego przy nie przyciągniętej kotwicy, w cm^{-1}

- $R_{\mu 0}$ — oporność magnetyczna obwodu strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy, w cm^{-1}
 $R_{\mu s}$ — oporność szczeliny powietrznej (oznaczenie ogólne), w cm^{-1}
 $R_{\mu z}$ — oporność magnetyczna części ferromagnetycznych obwodu strumienia roboczego, w cm^{-1}
 $r_{\mu s \min}$ — względna minimalna oporność zależnej szczeliny powietrznej przy nie przyciągniętej kotwicy
 $r'_{\mu s \min}$ — względna minimalna oporność zależnej szczeliny powietrznej przy przyciągniętej kotwicy
 $r_{\mu \min}$ — względna minimalna oporność obwodu magnetycznego przy nie przyciągniętej kotwicy
 $r'_{\mu \min}$ — względna minimalna oporność obwodu magnetycznego przy przyciągniętej kotwicy
 $r_{\mu s \max}$ — względna maksymalna oporność zależnej szczeliny powietrznej przy nie przyciągniętej kotwicy
 $r'_{\mu s \max}$ — względna maksymalna oporność zależnej szczeliny powietrznej przy przyciągniętej kotwicy
 q_u — przekrój poprzeczny uzwojenia, w cm^2
 S — powierzchnia chłodząca uzwojenia, w cm^2
 s_r — przekrój rdzenia, w cm^2
 s_s — przekrój szczeliny powietrznej (powierzchnia nabiegunnika), w cm^2
 V_m — objętość miedzi w uzwojeniu, w cm^3
 V_s — objętość obwodu magnetycznego, w cm^3
 t — czas, w sekundach
 t_p — czas przyciągania, w s
 t_{pu} — czas potrzebny do osiągnięcia przez strumień wartości strumienia przyciągania, w s
 t_k — czas przelotu kotwicy, w s
 $X_{0\Phi}$ — współczynnik bezpieczeństwa zwalniania
 $X_{p\Phi}$ — współczynnik bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do ustalonej wartości strumienia magnetycznego
 X_{pi} — współczynnik bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do ustalonej wartości prądu
 X_{pid} — dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do ustalonej wartości prądu
 $X_{i\Phi}$ — współczynnik bezpieczeństwa trzymania w odniesieniu do ustalonej wartości strumienia
 z — liczba zwojów uzwojenia
 α — kąt nachylenia kotwicy w stosunku do jarzma
 α_0 — kąt nachylenia kotwicy w stanie pracy, w radianach (rys. 12)
 α_p — kąt nachylenia kotwicy w stanie spoczynku, w radianach (rys. 12)

- α_{opt} — optymalny kąt, przy którym zachodzi najlepsze wykorzystanie energii zawartej w polu magnetycznym
- β — współczynnik minimalnej oporności zależnej szczeliny powietrznej równy 0,145
- γ — przewodność właściwa materiału drutu nawojowego w $\Omega^{-1} \text{ m mm}^{-2}$
- γ_z — liczba zależnych szczelin powietrznych
- δ — długość szczeliny powietrznej między rdzeniem a kotwicą, w cm
- δ_a — wysokość sztyftu antymagnetycznego, w cm
- δ_s — skok kotwicy, w cm
- $\frac{\delta}{s_s}$ — oporność magnetyczna szczeliny powietrznej, w cm^{-1}
- μ — przenikalność magnetyczna materiału obwodu magnetycznego
- τ — stała czasowa, w sekundach
- τ_0 — ogólna stała czasowa obwodu uzwojenia przy przyciągniętej kotwicy, w sekundach
- τ_p — ogólna stała czasowa obwodu uzwojenia przy nie przyciągniętej kotwicy, w sekundach
- τ_r — stała czasowa obwodu uzwojenia w odniesieniu do strumienia roboczego, w sekundach
- τ_{rp} — stała czasowa obwodu uzwojenia w odniesieniu do strumienia roboczego przy nie przyciągniętej kotwicy, w sekundach
- τ_{r0} — stała czasowa obwodu uzwojenia w odniesieniu do strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy, w sekundach
- τ_s — stała czasowa obwodu uzwojenia w odniesieniu do strumienia rozproszenia, w sekundach
- τ'_{min} — minimalna wartość stałej czasowej obwodu uzwojenia w odniesieniu do strumienia roboczego przy nie przyciągniętej kotwicy, w sekundach
- τ_{rmin} — minimalna wartość stałej czasowej obwodu uzwojenia w odniesieniu do strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy, w sekundach
- τ_{pk} — średnia stała czasowa obwodu uzwojenia podczas przelotu kotwicy, w sekundach
- Φ_r — strumień roboczy, w Mx
- Φ_{rmax} — maksymalna wartość strumienia roboczego przy całkowicie nasyconej kotwicy, w Mx
- Φ_{rp} — roboczy strumień przyciągania kotwicy, w Mx
- Φ'_{r0} — roboczy strumień zwalniania kotwicy, w Mx
- Φ_{ru} — ustalona wartość strumienia roboczego przy nie przyciągniętej kotwicy, w Mx
- Φ'_{ru} — ustalona wartość strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy, w Mx
- Φ'_k — szczytkowy strumień magnetyczny przy przyciągniętej kotwicy, w Mx

- Φ_s — sprowadzony strumień rozproszenia, w Mx
 Φ_{sr} — rzeczywisty strumień rozproszenia, w Mx
 φ_r — względna wartość strumienia roboczego
 φ_{rp} — względna wartość strumienia przyciągania
 φ'_{ro} — względna wartość strumienia zwalniania
 φ'_k — względna wartość strumienia szczątkowego
 φ_{ru} — względna ustalona wartość strumienia roboczego przy nie przyciągniętej kotwicy
 φ'_{ru} — względna ustalona wartość strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy
 φ_{rk} — względna wartość strumienia roboczego podczas przelotu kotwicy

1. WSTĘP

Elektromagnesowy układ napędowy zazwyczaj składa się z rdzenia zaopatrzonego w uzwojenia wzbudzające, jarzma i ruchomej kotwicy, napędzającej mechanizm czy też układ sprzężyn stykowych. Pod wpływem przepływającego prądu w obwodzie magnetycznym układu napędowego zostaje wzbudzony strumień, który powoduje przyciągnięcie kotwicy do rdzenia z odpowiednią siłą, przy czym siła ta jest zależna od wymiarów rdzenia i kotwicy oraz od wartości amperozwojów dostarczanych przez uzwojenie. Elektromagnesowe układy napędowe odznaczają się prostotą konstrukcji, stosunkowo małymi wymiarami i dość dużą szybkością działania (od kilku do kilkudziesięciu milisekund). Zagadnienie umieszczenia układu napędowego blisko miejsca zapotrzebowania na ruch oraz doprowadzenie do niego energii nie przedstawiają żadnych trudności.

W niniejszym artykule wprowadzono zależności między poszczególnymi parametrami elektromagnesowego układu napędowego, podano metody obliczeniowe oraz przytoczono wyniki obliczeń kilku układów napędowych.

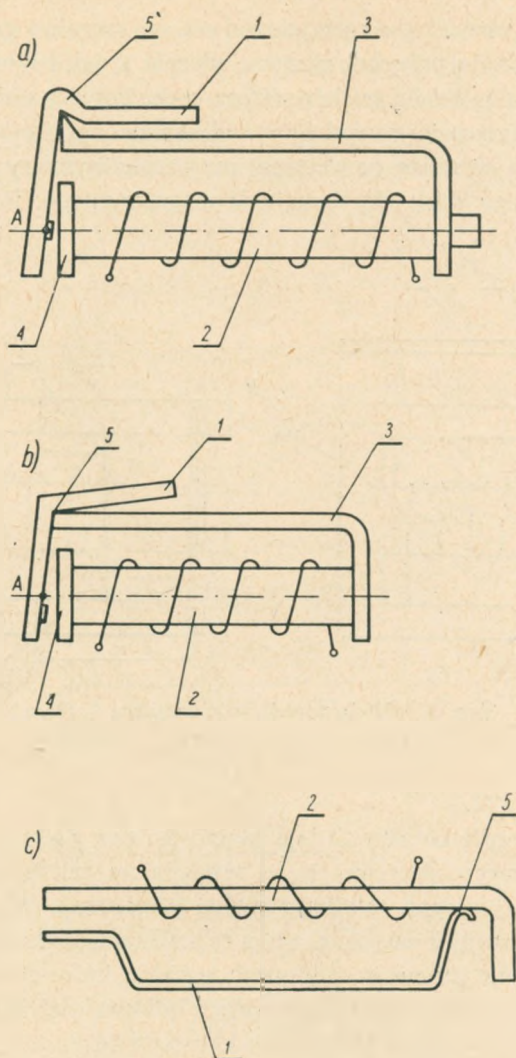
2. ZAŁOŻENIA PODSTAWOWE

2.1. Rodzaje konstrukcji

W elektromagnesowych układach napędowych mogą być w zasadzie stosowane dwa typy kotwicy, a mianowicie:

- kotwice nie nasycane w czasie pracy,
- kotwice nasycane w czasie pracy.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono szkice układów napędowych wymienionych typów. Na rys. 1 podano najczęściej stosowane układy napędowe o nie nasycanej kotwicy, przy czym pod a) został przedstawiony szkic układu napędowego produk-



Rys. 1. Układy napędowe z nie nasyconą (zwykłą) kotwicą

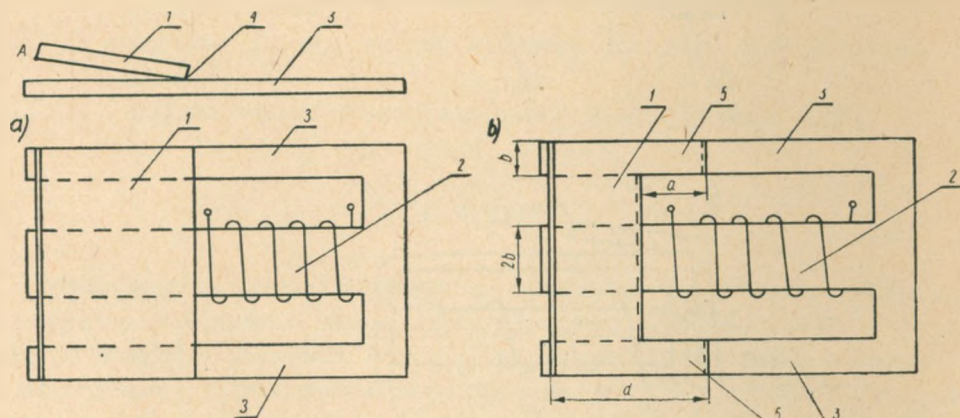
1 — kotwica, 2 — rdzeń z uzwojeniem, 3 — jarzmo, 4 — nabiegownik, 5 — oś obrotu kotwicy, A — punkt przyłożenia siły odciągającej kotwicę

wanego w Polsce neutralnego¹⁾ przekaźnika telefonicznego B1, pod b) szkic układu napędowego, produkowanego w Polsce przekaźnika C1, a pod c) szkic układu napędowego przekaźnika płaskiego firmy *Siemens i Halske*.

Na rysunku 2 podano układy napędowe neutralnego przekaźnika telefonicznego o nasyconej podczas pracy kotwicy, opracowanego przez firmę *Bell* — typu AF.

¹⁾ Neutralny przekaźnik telefoniczny jest to przekaźnik, którego działanie nie zależy od kierunku prądu przepływającego przez jego uzwojenie.

W przypadku a) w obwodzie magnetycznym nie ma szczeliny powietrznej, kotwica 1 bowiem dotyka swoim brzegiem zarówno rdzenia 2, jak i ramion jarzma 3. Przy załączeniu uzwojenia do źródła prądu w miejscu styku kotwicy z rdzeniem i ramionami jarzma występuje nasycenie powodujące zwiększenie oporności na tym odcinku, wytwarzając niejako szczelinę powietrzną, przy czym wymiary tej szczeliny zależą od wartości płynącego przez nią strumienia magnetycznego. Im większy jest stru-



Rys. 2. Układy napędowe z nasyconą kotwicą

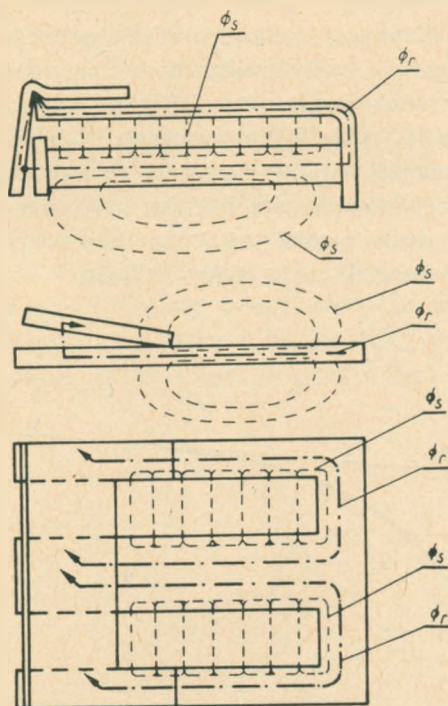
1 — kotwica, 2 — rdzeń, 3 — ramię jarzma, 4 — oś obrotu kotwicy, 5 — ramię kotwicy, A — punkt przyłożenia siły odciągającej kotwicę

mień, tym większa część kotwicy zostaje nasycona i tym większa powstaje oporność obwodu magnetycznego. Szczelina ta ze względu na zależność jej oporności od strumienia zostanie nazwana zależną szczeliną powietrzną. W przypadku b) (por. rys. 2) kotwica jest również nasycona, z tym że z uwagi na dokonane wcięcie (wymiar a) nasycenie występuje jedynie w ramionach kotwicy, które dotykają odpowiednich ramion jarzma. Natomiast w szczelinie między środkową częścią kotwicy a rdzeniem, wobec braku bezpośredniego zetknięcia się kotwicy z rdzeniem omawiane nasycenie nie występuje i oporność jej jest wielkością niezależną od strumienia magnetycznego. Ta szczelina ze względu na niezależność jej oporności od strumienia magnetycznego zostanie nazwana niezależną szczeliną powietrzną.

2.2. Strumień magnetyczny

W każdym elektromagnesie neutralnym całkowity strumień magnetyczny można podzielić na strumień roboczy Φ_r (przechodzący przez kotwicę) i strumień rozproszenia Φ_s (omijający kotwicę). Na rys. 3 podano przebieg linii sił obu tych strumieni.

W rozpatrywanych układach napędowych strumień roboczy Φ_r , przechodzący przez kotwicę, powoduje powstanie siły przyciągającej kotwicę do rdzenia. Natomiast strumień rozproszenia Φ_s , przechodzący częściowo przez powietrze, a częściowo przez rdzeń i jarzmo, omija kotwicę i powoduje z jednej strony zwiększenie nasycenia w rdzeniu i jarzmie, a z drugiej strony zwiększenie indukcyjności uzwojenia przekąźni-



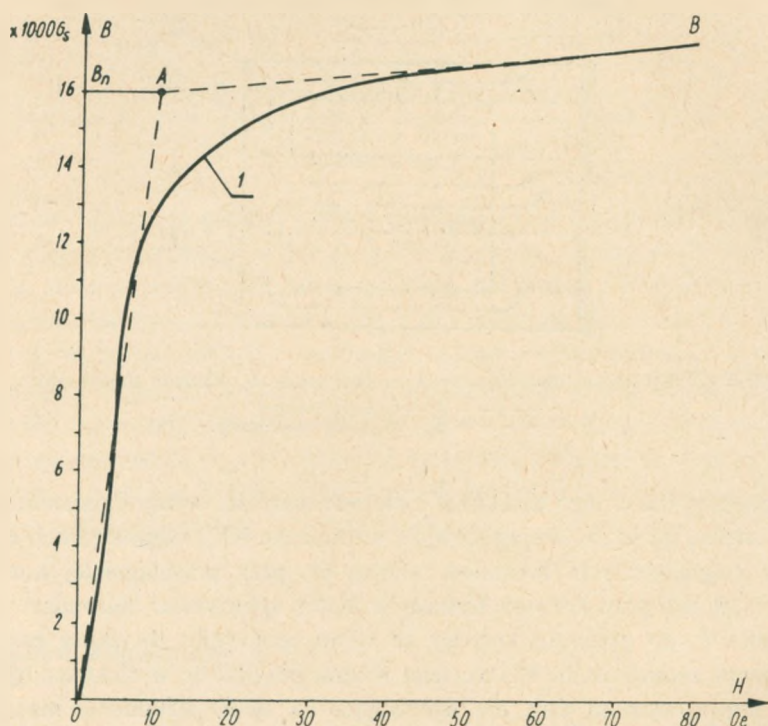
Rys. 3. Strumienie magnetyczne w rozpatrywanych układach napędowych

— — — — — Φ_r — strumień roboczy
 - - - - - Φ_s — strumień rozproszenia

ka i zwiększenie czasu jego działania. Ustalone wartości wyżej wymienionych strumieni są zależne od liczby amperozwojów wzbudzających i odpowiednich oporności obwodów magnetycznych. Strumień roboczy Φ_r , przy przyciągniętej kotwicy jest dużo większy, niż przy kotwicy będącej w stanie spoczynku. Natomiast strumień rozproszenia Φ_s po przejściu kotwicy ze stanu spoczynku do stanu pracy ulega nieznacznemu zmniejszeniu. Wobec tego można przyjąć, że w elektromagnesowym układzie napędowym są dwa nie wpływające na siebie strumienie magnetyczne: strumień roboczy Φ_r , zależny od liczby amperozwojów wzbudzających i położenia kotwicy, oraz strumień rozproszenia Φ_s , zależny jedynie od liczby amperozwojów wzbudzających.

2.3. Przenikalność magnetyczna stali zastosowanej w obwodzie magnetycznym

Strumień roboczy w większej części swojego obwodu przebiega przez rdzeń, jarzmo i kotwicę, wykonane z żelaza lub jego stopów. Na rys. 4 przedstawiono krzywą magnesowania, tj. zależność indukcji B od natężenia pola magnetycznego H dla stali o małej zawartości węgla, tzw. stali przekąźnikowej. Jak pokazano na omawianym rysunku, krzywa $B = f(H)$ może być zastąpiona dwiema prostymi OA i AB . Należy zwrócić uwagę, że dla zapewnienia pewności pracy układu napędowego zjawisko przyciągania kotwicy musi zachodzić przy wartości indukcji mniejszej niż $B = 11000$, tj. przy indukcji znacznie mniejszej od indukcji nasycenia, wynoszącej w tym przypadku $B_n \approx 16000$ Gs. Dla uproszczenia można przyjąć, że przenikalność stali przekąźnikowej poniżej indukcji nasycenia B_n wynosi $\mu = 1600$ (tangens nachylenia prostej OA). Natomiast dla zakresu nasycenia przenikalność wyniesie $\mu = 25$ (tangens nachylenia prostej AB). Największa dynamiczna przenikalność wynosi $\mu = 2500$ przy indukcji rzędu $6000 \div 7000$ Gs.

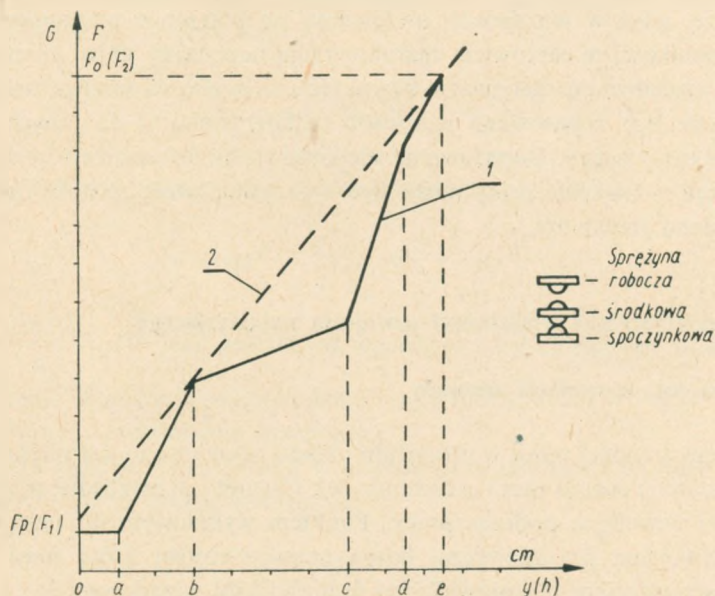


Rys. 4. Krzywa magnesowania $B = f(H)$

I — krzywa magnesowania żelaza przekąźnikowego, B_n — umowna indukcja nasycenia, prosta OA — linearyzacja w obszarze braku nasycenia ($\mu = 1600$), prosta AB — linearyzacja w obszarze nasycenia ($\mu = 25$)

2.4. Siła odciągająca kotwicę

Układ sprężyn stykowych lub też inny uruchamiany mechanizm oddziałuje na kotwicę bezpośrednio lub za pomocą dźwigni. Oddziaływanie (nacisk) to jest zmienne i zależne od odległości kotwicy od rdzenia. W czasie zbliżania się kotwicy do rdzenia omawiane oddziaływanie układu sprężyn może się zmieniać nierównomiernie. Na rys. 5 przedstawiono przykładowo przebieg siły odciągającej kotwicę przy pojedynczym układzie przełączającym sprężyn stykowych. Przy kilku układach sprężyn stykowych lub innym mechanizmie przebieg siły odciągającej kotwicę może być bardziej skomplikowany. W celu uproszczenia zagadnienia oddziaływania uruchamianego układu sprężyn (mechanizmu) przyjęto, że siła odciągająca wzrasta proporcjonalnie do drogi przebytej przez kotwicę, przy czym to narastanie odbywa się od określonej wartości większej od zera. Na rys. 5 zaznaczono linią przerywaną przyjęty w danym przypadku przebieg siły odciągającej kotwicę w zależności od przebytej przez nią drogi. W związku z powyższym za każdym razem należy określić siłę F_p (przyciągania) odciągającą kotwicę w jej spoczynkowym położeniu oraz siłę F_o (odpadania) odciągającą kotwicę w jej krańcowym położeniu pracy. Siły te działają w odpowiednim punkcie kotwicy, na przykład w przypadku układów napędowych przedstawionych na rys. 1 będą to punkty A na osi rdzenia, a w przy-



Rys. 5. Zależność siły odciągającej przełączającego układu sprężyn od położenia kotwicy

Oa — okres swobodnego ruchu kotwicy, ab — okres odłączenia zestyku rozwiernego, bc — okres ruchu samej sprężyny środkowej, cd — okres załączania zestyku zwiernego, de — okres wspólnego ruchu sprężyny środkowej i roboczej, $F_p(F_1)$ — siła odciągająca kotwicę w pozycji spoczynkowej, $F_o(F_2)$ — siła odciągająca kotwicę w pozycji pracy, 1 — rzeczywisty przebieg siły odciągającej kotwicę, 2 — przebieg siły odciągającej kotwicę przyjęty w rozważaniach

padku układu przedstawionego na rys. 2 będzie to zewnętrzny brzeg kotwicy, tj. punkt A .

Praca wykonana przez układ napędowy przy założonym przebiegu siły odciągającej podczas ruchu kotwicy o wielkości δ_s przy pominięciu tarcia w łożyskach będzie równa:

$$A = \frac{F_p + F_0}{2} \cdot \delta_s \quad [\text{Gcm}] \quad (1)$$

lub

$$A = 0,5 \cdot (F_p \cdot \delta_s + F_0 \cdot \delta_s) \quad [\text{Gcm}] \quad (2)$$

Obecnie wprowadzimy pojęcie pracy początkowej kotwicy, to znaczy pracy wykonanej przez kotwicę podczas swojego ruchu na drodze δ_s w przypadku obciążenia stałego równego F_p , tj. sile działającej na kotwicę w stanie spoczynku, a mianowicie:

$$A_p = F_p \cdot \delta_s \quad [\text{Gcm}] \quad (3)$$

Analogicznie zostało wprowadzone pojęcie pracy końcowej, tzn. jaką pracę wykona kotwica podczas swojego ruchu na drodze δ_s w przypadku obciążenia stałego równego F_0 , tj. sile działającej na kotwicę w stanie przyciągania, a mianowicie:

$$A_0 = F_0 \cdot \delta_s \quad [\text{Gcm}] \quad (4)$$

Stosowanie pojęć pracy wykonywanej przez kotwicę zamiast sił jest znacznie dogodniejsze, gdyż w ten sposób uwzględnia się potrzebne przesunięcie kotwicy. Poza tym wielkości te całkowicie charakteryzują napędzany układ sprężyn (mechanizm) pod względem energetycznym bez określania wielkości samego ruchu, którego wartość może być dopasowana w sposób najkorzystniejszy do innych wymiarów obwodu magnetycznego. Dopasowanie wielkości ruchu do parametrów napędzanego układu sprężyn (mechanizmu) może być wykonane przez zastosowanie dźwigni o odpowiedniej przekładni.

2.5. Charakterystyczne właściwości uzwojenia wzbudzającego

2.5.1. Sprowadzona przewodność uzwojenia

Określenie traconej mocy w uzwojeniu układu napędowego jest ważne ze względu na ogólne zużycie energii przez urządzenie, jak również jest niezbędne przy obliczaniu temperatury uzwojenia podczas pracy. Punktem wyjściowym do przeprowadzenia obliczeń uzwojenia jest zazwyczaj liczba amperozwojów, którą musi dostarczyć uzwojenie wzbudzające dla prawidłowej pracy układu napędowego.

Jak wiadomo, moc tracona w uzwojeniu o przewodności G jest równa:

$$P = \frac{I^2}{G} \quad [W] \quad (5)$$

Natężenie prądu w zależności od amperozwojów AZ i liczby zwojów z będzie wynosić:

$$I = \frac{AZ}{z} \quad [A] \quad (6)$$

Natomiast przewodność uzwojenia cewki w zależności od długości średniego zwoju L_{sr} i średnicy drutu d_r będzie wynosiła:

$$G = \frac{\gamma \cdot d_r^2}{L_{sr} \cdot z} \cdot 10^2 \quad [S] \quad (7)$$

Podstawiając do wzoru (5) wyrażenia ze wzorów (6) i (7) otrzymamy, że moc P tracona w uzwojeniu będzie równa:

$$P = \frac{L_{sr}}{\gamma \cdot z \cdot \frac{\pi \cdot d_r^2}{4}} \cdot AZ^2 \cdot 10^{-2} \quad [W] \quad (7a)$$

Wyrażenie $z \cdot \frac{\pi \cdot d_r^2}{4}$ jest to pole zajęte przez miedź w przekroju poprzecznym uzwojenia. Wprowadzając współczynnik wypełnienia drutu nawojowego k_w oraz przekrój uzwojenia q_u , można napisać:

$$z \cdot \frac{\pi \cdot d_r^2}{4} = q_u \cdot k_w \cdot 10^2 \quad [cm^2] \quad (7b)$$

Wobec powyższego wzór na moc traconą w uzwojeniu przybierze postać:

$$P = AZ^2 \cdot \frac{L_{sr}}{\gamma \cdot q_u \cdot k_w} \cdot 10^{-4} \quad [W] \quad (8)$$

Wyrażenie $\frac{\gamma \cdot q_u \cdot k_w}{L_{sr}} \cdot 10^4$ jako zależne od wymiarów miejsca zajętego przez uzwojenie, przewodności właściwej materiału drutu i od współczynnika wypełnienia nazwiemy przewodnością sprowadzoną uzwojenia G_u .

Wobec tego wzór na moc traconą w uzwojeniu w zależności od liczby amperozwojów przyjmie swoją postać ostateczną:

$$P = \frac{AZ^2}{G_u} \quad [W] \quad (9)$$

przy czym

$$G_u = \gamma \cdot \frac{q_u \cdot k_w}{L_{sr}} \cdot 10^4 = \gamma \cdot \frac{l_u \cdot h_u \cdot k_w}{\pi(D_r + h_u)} \cdot 10^4 \quad [S] \quad (10)$$

Ze wzoru (9) widać, że moc tracona w uzwojeniu układu napędowego zależy tylko od kwadratu amperozwojów i sprawdzonej przewodności uzwojenia G_u . Natomiast ze wzoru (10) widać, że sprowadzona przewodność uzwojenia G_u jest równa przewodności jednego zwoju zajmującego to samo miejsce co całe uzwojenie, a wykonanego z materiału o przewodności właściwej, równej $\gamma \cdot k_w$. Należy zwrócić uwagę, że uzwojenia zajmujące to samo miejsce bez względu na średnicę drutu nawojowego mają bardzo zbliżoną sprowadzoną przewodność, przy czym różnice między tymi sprowadzonymi przewodnościami zależą jedynie od wartości współczynnika wypełnienia, która przy najczęściej stosowanych średnicach emaliowanego drutu nawojowego (od 0,07 do 0,2 mm) waha się w granicach od 0,4 do 0,51. Dla informacji warto podać, że sprowadzona przewodność uzwojenia przekątnika BI przy całkowitym wypełnieniu miejsca, przeznaczanego na uzwojenie, w zależności od średnicy zastosowanego drutu nawojowego waha się w granicach $0,22 - 0,28 \cdot 10^6 \Omega^{-1}$, a średnio wynosi $0,25 \cdot 10^6 \Omega^{-1}$.

Biorąc pod uwagę wzór (5), wzór (6) i wzór (9) sprowadzona przewodność uzwojenia może być wyrażona jako iloczyn przewodności uzwojenia i kwadratu liczby zwojów:

$$G_u = G \cdot z^2 \quad [S] \quad (11)$$

W związku z powyższymi rozważaniami można wprowadzić pojęcie największej przewodności przekroju przeznaczanego na uzwojenie, która jest równa przewodności uzwojenia przy współczynniku wypełnienia $k_w = 1$. Wtedy ta największa przewodność w zależności od średnicy rdzenia D_r , wysokości h_u i długości l_u , miejsca przeznaczanego na uzwojenia dla okrągłej cewki, będzie równa:

$$G_{um} = \gamma \cdot \frac{l_u \cdot h_u}{\pi(D_r + h_u)} \cdot 10^4 \quad [S] \quad (12)$$

2.5.2. Stała czasowa obwodu uzwojenia

Zgodnie ze znanymi zależnościami stała czasowa równa się stosunkowi indukcyjności L do oporności R obwodu uzwojenia:

$$\tau = \frac{L}{R} = L \cdot G \quad [S] \quad (13)$$

Poza tym indukcyjność elementu uzwojonego w zależności od oporności magnetycznej R_μ obwodu strumienia magnetycznego i liczby zwojów równa się:

$$L = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot z^2}{R_\mu} \cdot 10^{-8} \quad [H] \quad (14)$$

Wobec tego stała czasowa uzwojenia jest równa:

$$\tau = \frac{0,4 \cdot \pi}{R_{\mu}} \cdot G_{\mu} \cdot 10^{-8} \quad [\text{S}] \quad (15)$$

Z powyższego wzoru widać, że przy jednakowym wypełnieniu przekroju przeznaczonego na uzwojenie oraz przy stałej oporności magnetycznej obwodu strumienia stała czasowa obwodu uzwojenia jest wielkością prawie stałą (por. punkt 2.5.1), niezależną od liczby zwojów z .

Ze względu na to, że w obwodzie magnetycznym omawianych układów napędowych zostały wyróżnione dwa strumienie, a mianowicie strumień roboczy Φ_r i strumień rozproszenia Φ_s , można również przyjąć, że ogólna stała czasowa uzwojenia τ składa się ze stałej czasowej związanej ze strumieniem roboczym τ_r i stałej czasowej związanej ze strumieniem rozproszenia τ_s . Wobec tego można napisać:

$$\tau = \tau_s + \tau_r \quad [\text{s}] \quad (16)$$

2.5.3. Nagrzewanie się uzwojeń

Straty energii, jakie występują podczas działania układu napędowego, są to zazwyczaj straty ciepła, wydzielane w jego uzwojeniu.

Stratę energii w uzwojeniu można wyrazić wzorem:

$$A = I^2 \cdot R \cdot t \quad [\text{Ws}] \quad (17)$$

W przypadku kiedy układ napędowy pracuje przez dłuższy okres czasu, temperatura uzwojenia powoli wzrasta, osiągając po pewnym czasie wartość ustaloną. Szybkość narastania temperatury uzwojenia zależy od różnicy temperatury otoczenia i temperatury układu napędowego, od pojemności cieplnej uzwojenia i warunków jego chłodzenia. Praktycznie przy obecnie stosowanej izolacji drutu nawojowego (emalii) przyjmuje się, że dopuszczalna strata mocy przypadająca na dcm^2 powierzchni chłodzącej nie może przekraczać 10—12 W, przy czym za powierzchnię chłodzącą przyjmuje się tylko zewnętrzną walcową powierzchnię uzwojenia, pomijając odprowadzanie ciepła przez rdzeń i boki uzwojenia. Przy przerywanej pracy układu napędowego należy jako moc traconą w uzwojeniu brać średnią moc obliczoną w ciągu dłuższego okresu pracy.

Dopuszczalna wartość mocy, jaka może być tracona, pozwala określić dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do prądu w stanie ustalonym. Współczynnik bezpieczeństwa przyciągania jest równy:

$$X_{pi} = \frac{AZ_u}{AZ_p} \quad (18)$$

gdzie:

AZ_u — ustalona wartość amperozwojów,

AZ_p — amperozwoje przyciągania kotwicy.

Moc tracona w uzwojeniu, zgodnie ze wzorami (8), (9) i (12), jest równa:

$$P = AZ_u^2 \cdot \frac{\pi \cdot (D_r + h_u)}{\gamma \cdot l_u \cdot h_u \cdot k_w} \cdot 10^{-4} \quad [\text{W}] \quad (19)$$

Uwaga: W przypadkach rdzenia o przekroju prostokątnym lub kwadratowym oblicza się ekwiwalentną średnicę rdzenia równą obwodowi rdzenia podzielonemu przez liczbę π .

Powierzchnia chłodząca uzwojenia, zgodnie z wyżej podanymi uwagami, będzie równa:

$$S = \pi \cdot (D_r + 2 \cdot h_u) \cdot l_u \quad [\text{cm}^2] \quad (20)$$

Wobec tego maksymalna moc, jaka może być tracona w uzwojeniu, wyniesie:

$$P_m = \pi \cdot (D_r + 2 \cdot h_u) \cdot l_u \cdot p_{ch} \quad [\text{W}] \quad (21)$$

Uwzględniając wzory (9), (10), (12), (20) i (21) otrzymamy, że dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do prądu w stanie ustalonym X_{pid} będzie równy:

$$X_{pid} = \frac{100 \cdot l_u}{AZ_p} \cdot \sqrt{\gamma \cdot k_w \cdot p_{ch}} \cdot \sqrt{\frac{D_r + 2 \cdot h_u}{D_r + h_u} \cdot h_u} \quad (22)$$

gdzie: AZ_p — amperozwoje przyciągania.

Z powyższego wzoru można stwierdzić, że dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania X_{pid} zależy przede wszystkim od długości uzwojenia l_u , amperozwojów przyciągania AZ_p i od średnicy rdzenia D_r przy przyjęciu granic zmian stosunku wysokości uzwojenia h_u do średnicy rdzenia, określonych wzorem (36). Wyrażenie:

$$\sqrt{\gamma \cdot k_w \cdot p_{ch}} \quad (23)$$

zmienia się w dość wąskich granicach, a mianowicie $1,7 \pm 0,2$. Wobec tego można w przybliżeniu napisać, że dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania jest w przybliżeniu równy:

$$X_{pid} \cong \frac{180 \cdot l_u}{AZ_p} \cdot \sqrt{D_r} \quad (24)$$

przy $\gamma = 55 \Omega^{-1} \text{ m mm}^{-2}$; $\frac{h_u}{D_r} = 0,9$; $p_{ch} = 0,12 \text{ W/cm}^2$; $k_w = 0,4$.

2.6. Strumień rozproszenia

Indukcja magnetyczna rozproszenia w poszczególnych miejscach układu napędowego zależy od odległości między poszczególnymi częściami ferromagnetycznymi obwodu magnetycznego. W przestrzeni między jarzmem (ramionami jarzma) a rdze-

niem (por. rys. 3) indukcja rozproszenia jest większa, natomiast w pozostałej przestrzeni indukcja jest mniejsza ze względu na dłuższą drogę linii sił w powietrzu. Na podstawie rozważań zagadnienia rozproszenia w elektromagnesowych układach napędowych podanych w pracy pt.: „Elementy łączeniowe, sygnalizacyjne i zabezpieczające”, K. Kassenberg i J. Ruciński (pkt 2.4, rozdz. XI, t. III) dla obu rozpatrywanych układów napędowych przy całkowicie wypełnionym miejscu przeznaczonym na uzwojenie można napisać, że

— strumień rozproszenia (wartość rzeczywista) będzie równy:

$$\Phi_{ur} = \frac{0,4 \cdot \pi^2}{k_n} \cdot \frac{D_r + h_u}{h_u} \cdot \frac{l_r}{2} \cdot AZ \quad [\text{Mx}] \quad (25)$$

gdzie:

k_n — współczynnik oporności obwodu strumienia rozproszenia, wynoszący od 3 do 4,

D_r — średnica rdzenia lub w przypadku rdzenia nieokrągłego długość obwodu jego przekroju podzielona przez liczbę π , w cm,

h_u — wysokość miejsca przeznaczonego na uzwojenie, w cm,

l_r — długość rdzenia, w cm,

AZ — amperozwoje uzwojenia,

— strumień rozproszenia sprowadzony do całego uzwojenia:
(poszczególne linie sił obejmują tylko część uzwojenia)

$$\Phi_s = \frac{0,4 \cdot \pi^2}{k_n} \cdot \frac{D_r + h_u}{h_u} \cdot \frac{l_r}{3} \cdot AZ \quad [\text{Mx}] \quad (26)$$

Wobec tego oporność obwodu strumienia rozproszenia będzie równa:

$$R_{\mu n} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot AZ}{\Phi_s} k_n \cdot \frac{h_u}{D_r + h_u} \cdot \frac{1}{l_r} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (27)$$

Wartość tej oporności obwodu strumienia rozproszenia w przypadku układu napędowego o $l_r = 6$ cm, $\frac{h_u}{D_r} = 1$ zawiera się w granicach od 0,25 do 0,33 cm^{-1} .

Biorąc pod uwagę wzór (27), można określić indukcyjność oraz stałą czasową uzwojenia związaną ze strumieniem rozproszenia, a mianowicie:

— indukcyjność

$$L_n = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot z^2}{R_{\mu n}} \cdot 10^{-8} \quad [\text{H}] \quad (28)$$

— stała czasowa

$$\tau_s = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot G_u}{R_{\mu n}} \cdot 10^{-8} \quad [\text{s}] \quad (29)$$

2.7. Dane wyjściowe do obliczenia układu napędowego

Do obliczania układu napędowego, tzn. do ustalenia wymiarów obwodu magnetycznego, wymiarów kotwicy i miejsca przeznaczonego na uzwojenie, są potrzebne:

- wartość siły początkowej potrzebnej do uruchomienia napędzanego układu sprężyn stykowych (mechanizmu), F_1 w gramach,
- wartość siły końcowej potrzebnej do utrzymania napędzanego układu sprężyn (mechanizmu) w stanie pracy, F_2 w gramach,
- długość drogi niezbędnej dla całkowitego uruchomienia napędzanego układu sprężyn (mechanizmu) h , w centymetrach,
- czas zadziałania układu napędowego t_p , w sekundach.

Ze względu na to, że w wielu przypadkach siła oddziaływania napędzanego układu sprężyn (mechanizmu) nie wzrasta proporcjonalnie do drogi przebytej przez kotwicę, należy wyżej wymienione siły F_1 i F_2 określać w sposób podany na rys. 5.

Niezależnie od powyższych danych odnoszących się do napędzanego układu sprężyn (mechanizmu) należy stosownie do użytych materiałów przyjąć odpowiednie dane wyjściowe:

- dopuszczalna strata mocy na cm^2 powierzchni chłodzącej uzwojenia; przy pracy ciągłej układu napędowego i zastosowaniu drutu nawojowego izolowanego emalią przyjmuje się dopuszczalną stratę mocy na cm^2

$$p_{ch} = 0,12 \text{ W/cm}^2$$

- charakterystyka magnesowania materiału, z którego ma być wykonany obwód magnetyczny, $B = f(H)$ (por. rys. 4),
- siła powściągająca (koercji) materiału, z którego może być wykonany obwód magnetyczny, H_k w Oe.

Na podstawie wyżej wymienionych danych można określić pracę początkową i końcową kotwicy, a mianowicie:

potrzebna praca początkowa kotwicy

$$A_p = F_1 \cdot h \quad [\text{Gcm}] \quad (30)$$

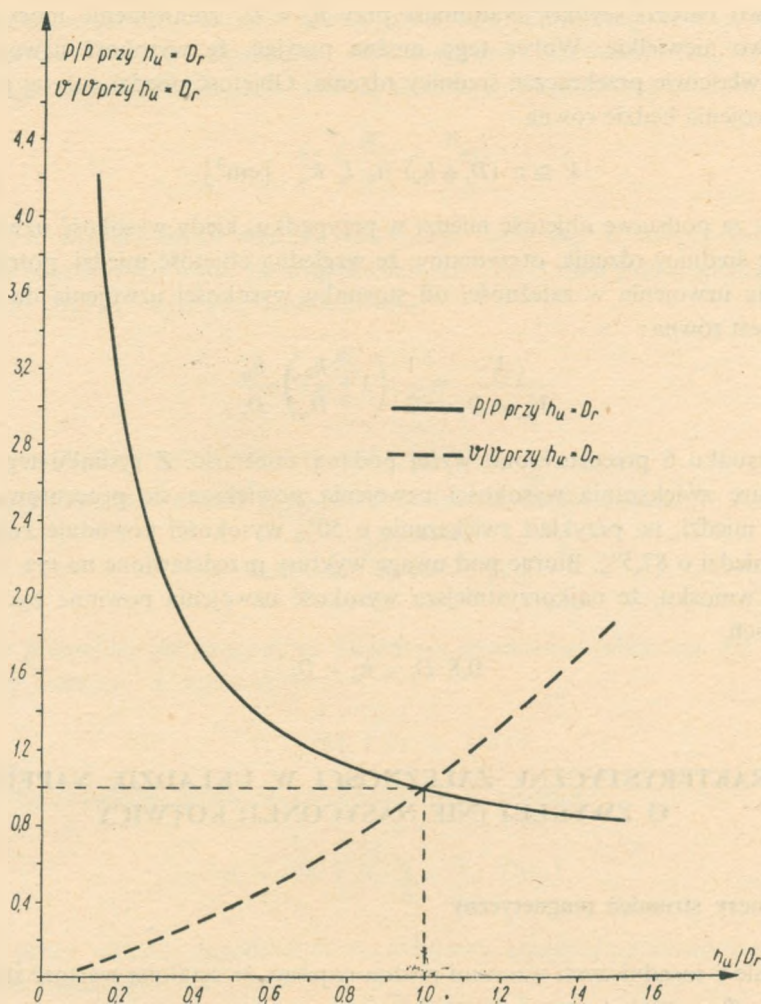
potrzebna praca końcowa kotwicy

$$A_0 = F_2 \cdot h \quad [\text{Gcm}] \quad (31)$$

Zgodnie ze wzorami (8), (9) i (12) moc tracona w uzwojeniu w zależności od amperozwojów jest równa:

$$P = AZ^2 \cdot \frac{\pi \cdot (D_r + h_u) \cdot k_w}{\gamma \cdot l_w \cdot h_u} \cdot 10^{-4} \quad [\text{W}] \quad (32)$$

Biorąc za podstawę moc traconą w przypadku, kiedy wysokość uzwojenia h_u



Rys. 6. Zależność względnych wartości mocy pobieranej przez uzwojenie oraz objętości miedzi od stosunku wysokości uzwojenia do średnicy rdzenia

równa się średnicy rdzenia D_r , otrzymamy, że względna moc tracona w uzwojeniu w zależności od stosunku wysokości uzwojenia do średnicy rdzenia jest równa:

$$\frac{P}{P_{h=D_r}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + \frac{h_u}{D_r}}{\frac{h_u}{D_r}} \quad (33)$$

Na rysunku 6 przedstawiono wyżej podaną zależność, przy czym z rysunku tego widać, że w miarę zwiększania wysokości uzwojenia moc tracona w uzwojeniu maleje

początkowo bardzo szybko. Natomiast przy $h_u > D_r$ zmniejszenie mocy jest już stosunkowo niewielkie. Wobec tego można przyjąć, że wysokość uzwojenia nie powinna właściwie przekraczać średnicy rdzenia. Objętość miedzi zużytej na wykonanie uzwojenia będzie równa

$$V \cong \pi \cdot (D_r + h_u) \cdot h_u \cdot l_u \cdot k_w \quad [\text{cm}^3] \quad (34)$$

Biorąc za podstawę objętość miedzi w przypadku, kiedy wysokość uzwojenia h_u równa się średnicy rdzenia, otrzymamy, że względna objętość miedzi, potrzebna do wykonania uzwojenia w zależności od stosunku wysokości uzwojenia do średnicy rdzenia, jest równa:

$$\frac{V}{V_{k_u = D_r}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{h_u}{D_r}\right) \cdot \frac{h_u}{D_r} \quad (35)$$

Na rysunku 6 przedstawiono wyżej podaną zależność. Z rysunku tego widać, że w miarę zwiększania wysokości uzwojenia powiększa się procentowy wzrost objętości miedzi, na przykład zwiększenie o 50% wysokości powoduje zwiększenie zużycia miedzi o 87,5%. Biorąc pod uwagę wykresy przedstawione na rys. 6, można dojść do wniosku, że najkorzystniejsza wysokość uzwojenia powinna być zawarta w granicach

$$0,8 \cdot D_r < h_u < D_r \quad (36)$$

3. CHARAKTERYSTYCZNE ZALEŻNOŚCI W UKŁADZIE NAPĘDOWYM O ZWYKŁEJ (NIE NASYCONEJ) KOTWICY

3.1. Roboczy strumień magnetyczny

Zgodnie z zasadniczymi wzorami można napisać, że ustalona wartość strumienia roboczego Φ_{ru} przy nie przyciągniętej kotwicy wynosi:

$$\Phi_{ru} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot AZ_u}{R_{\mu p}} \quad [\text{Mx}] \quad (37)$$

gdzie $R_{\mu p}$ — oporność magnetyczna obwodu strumienia roboczego przy nie przyciągniętej kotwicy, w cm^{-1} .

Natomiast przy kotwicy przyciągniętej ustalona wartość strumienia roboczego będzie równa:

$$\Phi'_{ru} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot AZ_u}{R_{\mu 0}} \quad [\text{Mx}] \quad (38)$$

gdzie $R_{\mu 0}$ — oporność magnetyczna obwodu strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy, w cm^{-1} .

Stosunek wartości strumienia roboczego w obu położeniach kotwicy przy stałej liczbie amperozwojów uzwojenia wzbudzającego nazwiemy współczynnikiem wzrostu strumienia roboczego w stanach ustalonych i oznaczymy przez k_s :

$$k_s = \frac{\Phi'_{ru}}{\Phi_{ru}} = \frac{R_{\mu p}}{R_{\mu 0}} \quad (39)$$

Wartość współczynnika wzrostu strumienia roboczego k_s w przekąźnikowych układach napędowych waha się w granicach od 2 do 5. Siła przyciągająca kotwicę, zgodnie ze znanymi wzorami, będzie równa:

$$F_r = \frac{\Phi_r^2}{8 \cdot \pi \cdot s_s} \cdot \frac{1}{981} \quad [\text{G}] \quad (40)$$

gdzie s_s — przekrój szczeliny powietrznej, w cm^2 .

Wykonując mnożenie, można napisać z dostateczną dokładnością

$$F_r = 0,4 \cdot \frac{\Phi_r^2}{s_s} \cdot 10^{-4} \quad [\text{G}] \quad (41)$$

Niekiedy potrzebna jest znajomość zależności strumienia roboczego od siły przyciągającej kotwicę, a mianowicie:

$$\Phi_r = 158 \cdot \sqrt{F_r \cdot s_s} \quad [\text{Mx}] \quad (42)$$

lub też wprowadzając pracę wykonywaną przez kotwicę

$$\Phi_r = 158 \cdot \sqrt{A_r \cdot \frac{s_s}{\delta_s}} \quad [\text{Mx}] \quad (43)$$

Przy pracy układu napędowego rozróżniamy następujące chwilowe wartości strumienia roboczego:

- strumień roboczy przyciągania Φ_{rp} — jest to wartość strumienia, przy której siła przyciągająca kotwicę F_p równoważy siłę odciągającą kotwicę (kotwica w pozycji spoczynkowej) i powoduje rozpoczęcie ruchu kotwicy;
- strumień roboczy zwalniania Φ'_{ro} — jest to wartość strumienia, przy której siła przyciągająca kotwicę F_0 równa się sile odciągającej przy kotwicy, będącej w stanie przyciągania.

Poza tym wprowadzimy następujące współczynniki bezpieczeństwa:

— współczynnik bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do ustalonej wartości strumienia roboczego

$$X_{p\Phi} = \frac{\Phi_{ru}}{\Phi_{rp}} \quad (44)$$

— współczynnik bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do ustalonej wartości prądu

$$X_{pi} = \frac{AZ_u}{AZ_p} \quad (45)$$

— współczynnik bezpieczeństwa trzymania w odniesieniu do ustalonej wartości strumienia roboczego

$$X_{r\Phi} = \frac{\Phi'_{ru}}{\Phi'_{ro}} \quad (46)$$

— współczynnik bezpieczeństwa zwalniania

$$X_{0\Phi} = \frac{\Phi'_{ro}}{\Phi'_k} \quad (47)$$

gdzie Φ'_k — strumień szczątkowy wywołany siłą koercji materiału obwodu magnetycznego.

Zgodnie z wzorem (43) można określić strumienie przyciągania i zwalniania w zależności od pracy początkowej i końcowej kotwicy (por. pkt. 2.4), a mianowicie:

$$\Phi_{rp} = 158 \cdot \sqrt{A_p} \cdot \sqrt{\frac{s_s}{\delta_s}} \quad [\text{Mx}] \quad (48)$$

oraz

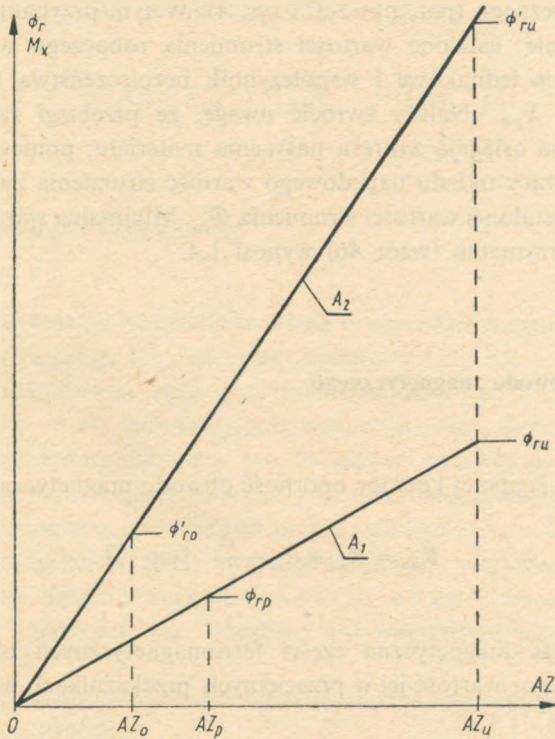
$$\Phi_{ro} = 158 \cdot \sqrt{A_0} \cdot \sqrt{\frac{s_s}{\delta_s}} \quad [\text{Mx}] \quad (49)$$

Dzieląc powyższe wzory stronami i wprowadzając uprzednio ustalone współczynniki otrzymamy zależność

$$\frac{k_s \cdot X_{p\Phi}}{X_{r\Phi}} = \sqrt{\frac{A_0}{A_p}} \quad (50)$$

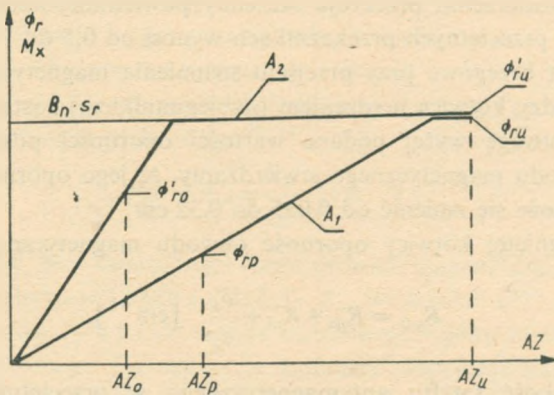
Na rysunku 7 podano zależność wartości strumienia roboczego od amperozwojów uzwojenia wzbudzającego w przypadku zastosowania na rdzeń, jarzmo i kotwicę materiału o stałej przenikalności (brak nasycenia). Na wykresie tym zaznaczono amperozwoje przyciągania AZ_p , amperozwoje zwalniania AZ_0 oraz amperozwoje ustalone AZ_u . Poza tym zaznaczono również odpowiednie wartości strumienia przyciągania Φ_{rp} , strumienia zwalniania Φ'_{ra} oraz ustalone wartości strumienia roboczego w obu położeniach kotwicy Φ_{ru} i Φ'_{ru} . W tym przypadku współczynnik bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do ustalonej wartości prądu X_{pi} (por. wzór 45) jest równy współczynnikowi bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do ustalonej wartości strumienia roboczego $X_{p\Phi}$ (por. wzór 44).

Na rysunku 8 podano zależność wartości strumienia roboczego od amperozwojów uzwojenia wzbudzającego w przypadku założonej przenikalności materiału



Rys. 7. Zależność strumienia roboczego od amperozwojów przy stałej przenikalności materiału obwodu magnetycznego

A_1 — kotwica nie przyciągnięta, A_2 — kotwica przyciągnięta



Rys. 8. Zależność strumienia roboczego od amperozwojów przy przenikalności materiału obwodu magnetycznego, podanej na rys. 4

A_1 — kotwica nie przyciągnięta, A_2 — kotwica przyciągnięta, B_n — indukcja nasycenia, s_r — przekrój rdzenia

obwodu magnetycznego (por. pkt 2.3. i rys. 4). W tym przypadku, z uwagi na zachodzące nasycenie, ustalone wartości strumienia roboczego w obu położeniach kotwicy są prawie jednakowe i współczynnik bezpieczeństwa X_{pi} nie różni się od współczynnika $X_{p\Phi}$. Należy zwrócić uwagę, że przebiegi zachodzące podczas ruchu kotwicy nie osiągają zakresu nasycenia materiału, ponieważ ze względu na bezpieczeństwo pracy układu napędowego wartość strumienia zwalniania Φ'_{r0} musi być mniejsza od ustalonej wartości strumienia Φ'_{ru} . Minimalna wartość współczynnika bezpieczeństwa trzymania (wzór 46) wynosi 1,4.

3.2. Oporność obwodu magnetycznego

Przy nie przyciągniętej kotwicy oporność obwodu magnetycznego będzie równa:

$$R_{\mu p} = R_{\mu z} + R_{\mu l} + \frac{\delta}{s_s} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (51)$$

gdzie:

$R_{\mu z}$ — oporność magnetyczna części ferromagnetycznych obwodu strumienia roboczego; wartość jej w przeciętnych przekątnikach wynosi od 0,005 do 0,01 cm^{-1} ;

$R_{\mu l}$ — oporność magnetyczna szczelin powietrznych z pominięciem szczeliny między kotwicą a rdzeniem; wartość jej w przeciętnych przekątnikach wynosi od 0,005 do 0,01 cm^{-1} ;

δ — długość szczeliny powietrznej między kotwicą i rdzeniem; wartość jej w przeciętnych przekątnikach wynosi od 0,05 do 0,15 cm;

s_s — pole powierzchni przekroju szczeliny powietrznej nabiegunnika; wartość jego w przeciętnych przekątnikach wynosi od 0,5 do 2 cm^2 .

Uwaga. Zjawiska brzegowe przy przejściu strumienia magnetycznego przez szczelinę między kotwicą a rdzeniem (nabiegunnikiem) zostały pominięte.

Biorąc pod uwagę wyżej podane wartości oporności poszczególnych części składowych obwodu magnetycznego stwierdzamy, że jego oporność w przeciętnych przekątnikach może się zmienić od 0,035 do 0,32 cm^{-1} .

Przy przyciągniętej kotwicy oporność obwodu magnetycznego będzie równa:

$$R_{\mu 0} = R_{\mu z} + R_{\mu l} + \frac{\delta_a}{s_s} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (52)$$

gdzie δ_a — wysokość sztyftu antymagnetycznego w przeciętnych przekątnikach wynosi od 0,005 do 0,05 cm.

Biorąc pod uwagę powyższe dane, oporność obwodu magnetycznego w przeciętnych przekątnikach w stanie przyciągnięcia kotwicy wynosi od 0,012 do 0,12 cm^{-1} .

Poza tym, oporność szczeliny powietrznej odpowiadającej skokowi kotwicy będzie równa:

$$\frac{\delta_s}{s_s} = R_{\mu p} - R_{\mu 0} = R_{\mu 0} (k_s - 1) \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (53)$$

3.3. Szczątkowy strumień magnetyczny

Po odłączeniu uzwojenia od źródła zasilania w obwodzie magnetycznym wskutek histerezy materiału powstaje tzw. strumień szczątkowy Φ'_k , który w pewnych przypadkach może spowodować stałe przytrzymanie kotwicy. Wartość strumienia szczątkowego zależy od siły powściągającej materiału magnetycznego, pozostałości magnetycznej, długości drogi linii sił w stali i wielkości szczeliny powietrznej. W celu zmniejszenia siły przytrzymującej kotwicę, po odłączeniu uzwojenia od źródła zasilania, części ferromagnetyczne obwodu magnetycznego należy wykonywać z materiału o małej sile powściągającej przy jednoczesnym utrzymaniu odpowiedniej szczeliny powietrznej. Szczelina zazwyczaj składa się ze szczelin między nieruchomymi częściami obwodu magnetycznego i szczeliny odpowiadającej sztyftowi magnetycznemu.

Po odłączeniu uzwojenia od źródła zasilania można napisać dla obwodu magnetycznego następujące równanie:

$$\Phi'_k = \frac{H_k \cdot l_s}{R'_{\mu k}} \quad [\text{Mx}] \quad (54)$$

gdzie:

Φ'_k — szczątkowy strumień magnetyczny, w Mx,

H_k — siła powściągająca, w Oe,

l_s — długość obwodu magnetycznego w stali, w cm,

$R'_{\mu k}$ — oporność obwodu magnetycznego, w cm^{-1} .

Zgodnie ze wzorem (52) oporność obwodu magnetycznego po odłączeniu uzwojenia od źródła zasilania będzie równa:

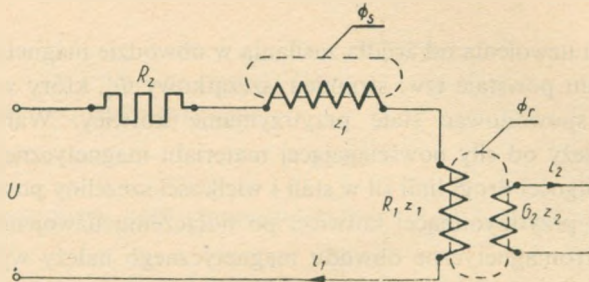
$$R'_{\mu k} = R_{\mu l} + \frac{\delta_a}{s_s} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (55)$$

Należy zaznaczyć, że w omawianym stanie obwodu magnetycznego przenikalność stali jest bardzo duża ($\mu = 12000$) i składnik $R_{\mu z}$ we wzorze (52) został pominięty. Na podstawie wzorów (47) i (55) można określić niezbędną minimalną wysokość sztyftu antymagnetycznego dla uzyskania żadanego współczynnika bezpieczeństwa zwalniania $X_{0\phi}$, por. wzór (47), następującym wyrażeniem

$$\delta_a = \frac{H_k \cdot X_{0\phi} \cdot s_s \cdot l_s - R_{\mu l} \cdot s_s}{\Phi_{r0}} \quad [\text{cm}] \quad (56)$$

3.4. Czas ustalania się strumienia przyciągania (kotwica w położeniu spoczynkowym)

Na rysunku 9 przedstawiono układ zastępczy obwodu uzwojenia wzbudającego układu napędowego, przy czym zaznaczono dwa strumienie magnetyczne: Φ_r i Φ_s . Strumień roboczy Φ_r jest sprzężony z uzwojeniem zwartym, przy czym tworzy się transformator o współczynniku sprzężenia równym 1. Natomiast strumień rozproszenia Φ_s jest sprzężony jedynie z uzwojeniem wzbudającym. Poza tym zaznaczono jeszcze opornik szeregowy R_z , który powodując zmniejszenie stałej czasowej obwodu



Rys. 9. Układ zastępczy obwodu uzwojenia wzbudającego

Φ_r — magnetyczny strumień roboczy, Φ_s — magnetyczny strumień rozproszenia, R_z — oporność szeregową, z_1 — liczba zwojów uzwojenia wzbudającego, z_2 — liczba zwojów uzwojenia zwanego, R_1 — oporność uzwojenia wzbudającego, G_2 — przewodność uzwojenia zwanego

uzwojenia, przyspiesza narastanie strumieni magnetycznych. Podany wtórny obwód zwarty może przedstawiać rzeczywiste uzwojenie zwarte lub obwody prądów wirowych. Istnienie obwodu zwanego powoduje opóźnienie narastania strumienia magnetycznego w stosunku do prądu wzbudzenia. W niniejszej pracy dla uproszczenia założono, że omawiane układy napędowe nie mają uzwojeń zwartych, a wpływ obwodów prądów wirowych przy załączaniu uzwojenia do źródła prądu daje się pominąć. W związku z powyższym dla obwodu uzwojenia wzbudającego przy zwartej oporności szeregowej R_z można napisać następujące równanie różniczkowe:

$$L_s \cdot \frac{di}{dt} + R_1 \cdot i + L_r \cdot \frac{di}{dt} = U \quad (57)$$

gdzie

L_s — indukcja związana ze strumieniem rozproszenia,

L_r — indukcja związana ze strumieniem roboczym.

Dzieląc obie strony wyrażenia (57) przez oporność uzwojenia wzbudającego R_1 , otrzymamy:

$$i + \left(\frac{L_s}{R_1} + \frac{L_r}{R_1} \right) \cdot \frac{di}{dt} = I_u \quad (58)$$

gdzie I_u — ustalona wartość prądu w obwodzie uzwojenia wzbudającego równa

$$\frac{U}{R_1}, \text{ w A.}$$

Poza tym wprowadzimy pojęcia:

τ_{rp} — stałej czasowej obwodu uzwojenia w stosunku do strumienia roboczego przy kotwicy nie przyciągniętej (por. wzór 15)

$$\tau_{rp} = \frac{L_r}{R_1} = \frac{0,4 \cdot \pi}{R_{\mu p}} \cdot G_u \cdot 10^{-8} \quad [\text{s}] \quad (59)$$

τ_s — stałej czasowej obwodu uzwojenia w stosunku do strumienia rozproszenia (por. wzór 29)

$$\tau_s = \frac{L_s}{R_1} = \frac{0,4 \cdot \pi}{R_{\mu n}} \cdot G_u \cdot 10^{-8} \quad [\text{s}] \quad (60)$$

τ_p — ogólnej stałej czasowej przy nie przyciągniętej kotwicy (por. wzór 16)

$$\tau_p = \tau_s + \tau_{rp} \quad [\text{s}] \quad (61)$$

Ostatecznie równanie różniczkowe dla prądu płynącego przez uzwojenie wzbudzające będzie się przedstawiało

$$i + \tau_p \cdot \frac{di}{dt} = I_u \quad (62)$$

Rozwiązując powyższe równanie otrzymamy, że chwilowa wartość prądu w obwodzie uzwojenia wzbudzającego jest równa:

$$i = I_u \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right) \quad [\text{A}] \quad (63)$$

gdzie t — czas upływający od momentu zamknięcia obwodu uzwojenia, w sekundach.

Z uwagi na uprzednio omówioną możliwość pominięcia wpływu prądów wirowych można napisać również wzór na chwilową wartość strumienia roboczego, a mianowicie:

$$\Phi_r = \Phi_{ru} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right) \quad [\text{Mx}] \quad (64)$$

Wobec tego czas potrzebny do osiągnięcia przez strumień wartości strumienia przyciągania będzie równy:

$$t_{urp} = \tau_p \cdot \ln \frac{\Phi_{ru}}{\Phi_{ru} - \Phi_{rp}} \quad [\text{s}] \quad (65)$$

Wprowadzając do powyższego wyrażenia uprzednio określony współczynnik bezpieczeństwa przyciągania $X_{p\Phi}$ w odniesieniu do ustalonej wartości strumienia otrzymamy, że czas

$$t_{urp} = \tau_p \cdot \ln \frac{X_{p\Phi}}{X_{p\Phi} - 1} \quad [\text{s}] \quad (66)$$

3.5. Przybliżony przebieg strumienia roboczego w czasie ruchu kotwicy przy jej przyciąganiu

Podczas pracy układu napędowego na jego kotwicę działają dwie siły: siła odciągająca napędzanego układu sprężyn (mechanizmu) oraz siła przyciągająca, wywołana przez roboczy strumień magnetyczny. Jeżeli pominąć opóźniający wpływ bezwładności części ruchomych układu napędowego oraz tarcie w łożysku, to kotwica poruszając się będzie zajmowała kolejno położenia, odpowiadające chwilowym stanom równowagi, w których siła odciągająca była równoważona przez czynną siłę przyciągającą. Wobec tego, każdej wartości strumienia roboczego przy jego narastaniu będzie odpowiadało określone położenie kotwicy i przy wartości strumienia przyciągania Φ_{rp} kotwica zajmuje swoje położenie spoczynkowe, a przy wartości strumienia zwalniania Φ'_{r0} — położenie pracy. Wobec tego ruch kotwicy będzie trwał przez czas potrzebny do zmiany strumienia od wartości Φ_{rp} do wartości Φ'_{r0} .

Strumień roboczy, będąc sprzężony z uzwojeniem wzbudzającym, nie może ulegać gwałtownym zmianom i szybkość jego narastania tuż przed rozpoczęciem ruchu kotwicy i zaraz po jego rozpoczęciu musi być taka sama. Wobec tego szybkość narastania strumienia w chwili uruchomienia kotwicy będzie równa (por. wzór 64):

$$\frac{d\Phi_{rp}}{dt} = \frac{1}{\tau_p} \cdot (\Phi_{ru} - \Phi_{rp})$$

$$\Phi_r = \Phi_{rp} \quad (67)$$

Podobnie szybkość narastania strumienia roboczego tuż przed zakończeniem ruchu i zaraz po jego zakończeniu musi być również taka sama. Wobec tego szybkość narastania strumienia w chwili zakończenia ruchu kotwicy będzie równa

$$\frac{d\Phi'_{r0}}{dt} = \frac{1}{\tau'_0} (\Phi'_{ru} - \Phi'_{r0})$$

$$\Phi_r = \Phi'_{r0} \quad (68)$$

gdzie τ'_0 — stała czasowa uzwojenia przy przyciągniętej kotwicy, w sekundach.

Po rozważeniu zagadnienia zmian stałych czasowych i maksymalnych wartości strumienia w obu stanach kotwicy przyjęto, że w czasie ruchu kotwicy szybkość narastania strumienia roboczego zmienia się proporcjonalnie do czasu. Na rys. 10 przedstawiono założoną zależność szybkości narastania strumienia roboczego od czasu.

Określając równanie prostej *A* na rys. 10 otrzymamy równanie szybkości narastania strumienia roboczego w czasie ruchu kotwicy w następującej postaci

$$\frac{d\Phi_{rk}}{dt} = \left(\frac{\Phi'_{ru} - \Phi'_{r0}}{\tau'_0} - \frac{\Phi_{ru} - \Phi_{rp}}{\tau_p} \right) \cdot t_k + \frac{\Phi_{ru} - \Phi_{rp}}{\tau_p} \quad (69)$$

gdzie t_k — czas przelotu kotwicy, w sekundach.

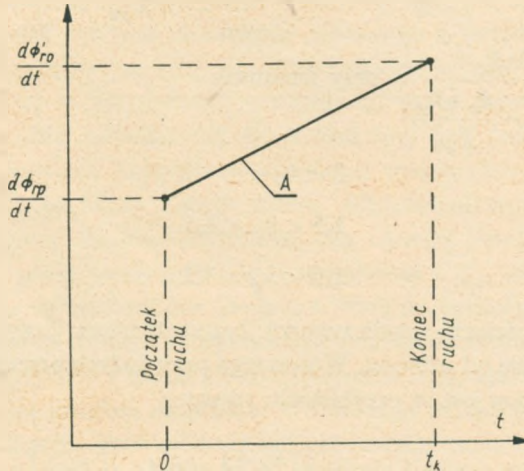
Po scałkowaniu i podstawieniu granic

$$t = 0$$

$$t = t_k$$

można rozwiązać powyższe równanie w stosunku do czasu przelotu kotwicy t_k , który będzie równy:

$$t_k = \frac{2 \cdot (\Phi'_{r0} - \Phi_{rp}) \cdot \tau_0 \cdot \tau_p}{\tau_0(\Phi_{ru} - \Phi_{rp}) + \tau_p \cdot (\Phi'_{ru} - \Phi_{r0})} \quad [s] \quad (70)$$



Rys. 10. Zależność szybkości narastania strumienia roboczego podczas przelotu kotwicy

Wprowadzimy współczynnik wzrostu stałej czasowej

$$k_c = \frac{\tau'_0}{\tau_p} = \frac{\tau_s + \tau_{r0}}{\tau_s + \tau_{rp}} \quad (71)$$

gdzie τ_{r0} — stała czasowa obwodu uzwojenia w odniesieniu do strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy, w sekundach
oraz współczynnik wzrostu strumienia roboczego podczas ruchu kotwicy

$$k_f = \frac{\Phi'_{r0}}{\Phi_{rp}} \quad (72)$$

który jednocześnie jest równy (por. wzory 48 i 49)

$$k_f = \sqrt{\frac{A_0}{A_p}} \quad (73)$$

Wprowadzając do wyrażenia (70) wyżej wymienione współczynniki k_c i k_f , zależność (50), współczynnik bezpieczeństwa przyciągania $X_{p\Phi}$ (por. wzór 44) oraz

współczynnik wzrostu strumienia k_s (por. wzór 39) otrzymamy, że czas ruchu kotwicy jest równy:

$$t_k = \tau_p \cdot \frac{2 \cdot (k_f - 1) \cdot k_c}{X_{p\Phi} \cdot (k_c + k_s) - (k_c + k_f)} \quad [\text{s}] \quad (74)$$

Przedstawiając powyższy wzór w postaci dwóch czynników otrzymamy:

$$t_k = \tau_p \cdot \frac{k_f - 1}{X_{p\Phi}} \cdot \frac{2 \cdot k_c}{k_c + k_s - \frac{k_c + k_f}{X_{p\Phi}}} \quad (75)$$

Wyrażenie $\frac{2 \cdot k_c}{k_c + k_s - \frac{k_c + k_f}{X_{p\Phi}}}$ przy zmianach

$$2 < k_s < 5$$

$$1,5 < k_c < 4,5$$

$$1,5 < k_f < 4,3$$

oraz dużych wartościach współczynnika bezpieczeństwa przyciągania $X_{p\Phi}$ praktycznie mało różni się od jedności. Wobec tego przy dużych przeciążeniach uzwojenia czas przelotu kotwicy jest w przybliżeniu równy:

$$t_k \simeq \tau_p \cdot \frac{k_f - 1}{X_{p\Phi}} \quad [\text{s}] \quad (76)$$

3.6. Czas działania układu napędowego

Jako czas działania układu napędowego przyjęto czas upływający od chwili włączenia lub odłączenia uzwojenia wzbudzającego od źródła prądu do chwili zajęcia przez kotwicę przeciwnego położenia krańcowego. Należy zaznaczyć, że w przypadkach kiedy układ napędowy uruchamia układ sprężyn stykowych, często jako czas działania przyjmuje się czas mierzony od chwili włączenia lub odłączenia uzwojenia wzbudzającego od źródła zasilania do chwili otwarcia czy zamknięcia określonego zestyku. Ponieważ przy tak ogólnych rozważaniach wobec niemożliwości sprecyzowania zestyku, w stosunku do którego ma być mierzony czas, przyjęto za podstawę momenty zajmowania przez kotwicę przeciwnego położenia krańcowego. W dalszych przeprowadzonych rozważaniach przyjęto, że uzwojenie wzbudzające jest załączone bezpośrednio do źródła prądu bez żadnych oporników szeregowych czy równoległych. Czas zadziałania układu napędowego będzie zatem równy sumie czasu t_{pu} potrzebnego do osiągnięcia przez narastający strumień wartości strumienia

przyciągania i czasu ruchu kotwicy (wzory 66 i 74)

$$t_p = \tau_p \cdot \left[\ln \frac{X_{p\Phi}}{X_{p\Phi} - 1} + \frac{2 \cdot (k_f - 1) \cdot k_c}{X_{p\Phi} \cdot (k_c + k_s) - (k_c + k_f)} \right] \quad [s] \quad (77)$$

Do powyższego wzoru wchodzi współczynnik bezpieczeństwa przyciągania $X_{p\Phi}$ w odniesieniu do ustalonej wartości strumienia roboczego Φ_{r0} . Współczynnik ten przy stałej przenikalności materiału ferromagnetycznego zastosowanego na części obwodu magnetycznego jest równy współczynnikowi bezpieczeństwa X_{pi} w odniesieniu do ustalonej wartości prądu (amperozwojów) w obwodzie uzwojenia, w założeniu zależności liniowej strumienia roboczego i amperozwojów. W rzeczywistym układzie napędowym założenie to jest słuszne jedynie w pewnym zakresie indukcji magnetycznej w jarzmie lub rdzeniu, tj. przed wystąpieniem zjawiska nasycenia stali, tzn. dla zwykłej stali przekątnikowej przy indukcji mniejszej od 12000 Gs. Przy wystąpieniu nasycenia w obwodzie magnetycznym wartości współczynników $X_{p\Phi}$ i X_{pi} mogą się bardzo różnić, gdyż współczynnik $X_{p\Phi}$ nie może praktycznie przekroczyć wartości określonej dla danego obwodu magnetycznego (por. rys. 7 i 8), a zwiększenie wartości współczynnika X_{pi} nie podlega żadnym ograniczeniom, poza ograniczeniami cieplnymi. Podczas przyciągania kotwicy przy końcu jej ruchu strumień roboczy osiąga wartość strumienia zwalniania Φ'_{r0} i indukcja w obwodzie magnetycznym z uwagi na zabezpieczenie odpowiedniej pewności pracy musi być mniejsza od indukcji nasycenia. Wobec tego można przyjąć, że w czasie całego okresu przyciągania kotwicy do chwili ukończenia ruchu kotwicy w obwodzie magnetycznym nie występuje nasycenie, i chwilowej wartości prądu w uzwojeniu wzbudzającym odpowiada proporcjonalna chwilowa wartość strumienia magnetycznego. W związku z tym we wzorze na czas przyciągania układu napędowego t_p możemy zamiast współczynnika bezpieczeństwa przyciągania $X_{p\Phi}$ podstawić współczynnik bezpieczeństwa przyciągania X_{pi} (w odniesieniu do ustalonej wartości amperozwojów).

Ta zamiana współczynników jest konieczna dla dalszych rozważań, gdyż w rzeczywistych układach napędowych przy przeciążeniu uzwojenia zachodzi wzrost szybkości narastania strumienia roboczego, mimo że współczynnik bezpieczeństwa $X_{p\Phi}$ pozostaje praktycznie bez zmian. Szybkość narastania strumienia roboczego w zakresie braku nasycenia (zakres zasadniczej pracy układu napędowego) zależna jest od teoretycznej ustalonej wartości strumienia roboczego, która wystąpiłaby w przypadku teoretycznej stałej przenikalności (braku nasycenia) materiału części ferromagnetycznych obwodu magnetycznego, przy czym ta teoretyczna wartość byłaby proporcjonalna do natężenia prądu (amperozwojów) w obwodzie uzwojenia. Jednak ta teoretyczna wartość na skutek nasycenia nie występuje i rzeczywisty, ustalony strumień roboczy zostaje ograniczony do wartości odpowiadającej indukcji nasycenia w rdzeniu lub jarzmie, przy czym ograniczenie to występuje dopiero po przyciągnięciu kotwicy.

W związku z powyższym rozumowaniem czas przyciągania układu napędowego będzie równy:

$$t_p = \tau_p \cdot \left[\ln \frac{X_{pi}}{X_{pi}-1} + \frac{2 \cdot (k_f - 1) \cdot k_c}{X_{pi} \cdot (k_c + k_s) - (k_c + k_f)} \right] \quad [\text{s}] \quad (78)$$

Przy dużych przeciążeniach uzwojenia (duża wartość współczynnika X_{pi}) można wprowadzić uproszczenie

$$\ln \frac{X_{pi}}{X_{pi}-1} \approx \frac{1}{X_{pi}} \quad (79)$$

W tym przypadku czas przyciągania układu napędowego, biorąc pod uwagę wzór (76), będzie równy (por. wzór 73)

$$t_p \approx \frac{\tau_p}{X_{pi}} \cdot \sqrt{\frac{A_0}{A_p}} \quad [\text{s}] \quad (80)$$

Otrzymaliśmy prostą zależność między czasem przyciągania układu napędowego, stałą czasową obwodu uzwojenia, współczynnikiem bezpieczeństwa przyciągania i stosunkiem pracy początkowej i końcowej kotwicy. Ten prosty wzór na czas przyciągania układu napędowego nadaje się tylko przy dużych przeciążeniach uzwojenia wzbudzającego i przy braku zwartych obwodów sprzężonych ze strumieniem roboczym.

3.7. Współczynnik oporności obwodu magnetycznego ze zwykłą (nie nasyconą) kotwicą

Oporność magnetyczna obwodu strumienia magnetycznego przy przyciągniętej kotwicy, zgodnie ze wzorem (54), przy uwzględnieniu wzorów (47), (52), (55) (w założeniu, że przekroje rdzenia, kotwicy i jarzma są jednakowe) i zależności:

$$\Phi'_{r0} = B_{r0} \cdot s_r \quad [\text{Mx}] \quad (81)$$

$$H_{r0} = \frac{B_{r0}}{\mu} \quad [\text{Oe}]$$

gdzie

μ — przenikalność materiału obwodu magnetycznego,

s_r — przekrój rdzenia, w cm^2

będzie równa:

$$R_{\mu 0} = \frac{l_s}{\Phi'_{r0}} \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi}) \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (82)$$

gdzie

l_s — długość linii sił w obwodzie magnetycznym, w cm,

H_{r0} — natężenie pola magnetycznego w Oe, które jest potrzebne do wywołania indukcji B_{r0} .

Po wprowadzeniu do powyższego wzoru wyrażeń (49), (53), określających strumień zwalniania i oporność szczeliny powietrznej $R_{\mu 0}$, wyznaczmy jako:

$$R_{\mu 0} = \frac{I_s^2}{A_0} \cdot 0,4 \cdot (k_s - 1) \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi}) \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (83)$$

Część powyższego wzoru, zależną od właściwości materiału ferromagnetycznych części obwodu magnetycznego i założonych współczynników, nazwiemy współczynnikiem oporności magnetycznej k_r , który jest równy:

$$k_r = 0,4 \cdot (k_s - 1) \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi}) \quad [\text{Gcm}^{-1}] \quad (84)$$

Wobec tego oporność magnetyczna obwodu strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy będzie równa:

$$R_{\mu 0} = \frac{k_r}{A_0} \cdot I_s^2 \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (85)$$

Do wzoru (85) na oporność magnetyczną obwodu strumienia roboczego wchodzi współczynnik k_r . Współczynnik ten jest równy oporności, którą powinien mieć obwód magnetyczny o długości równej 1 cm dla uzyskania pracy końcowej kotwicy równej 1 Gcm przy użyciu na obwód materiału o określonych właściwościach (H_{r0} i H_k) i przy założonych współczynnikach k_s i $X_{0\Phi}$. Przykładowo można podać, że dla $k_s = 3$, $H_{r0} = 5$ Oe ($B_{r0} = 10\,000$ Gs), $H_k = 0,9$ Oe i $X_{0\Phi} = 2$ współczynnik $k_r = 0,0037$ Gcm⁻².

Mając określoną oporność magnetyczną obwodu strumienia przy przyciągniętej kotwicy, można określić oporność magnetyczną obwodu strumienia przy nie przyciągniętej kotwicy (porównaj wzór 39), która będzie równa:

$$R_{\mu p} = \frac{k_s \cdot k_r}{A_0} \cdot I_s^2 \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (86)$$

oraz oporność magnetyczną szczeliny powietrznej odpowiadającej skokowi kotwicy (por. wzór 53)

$$\frac{\delta_s}{s_s} = \frac{(k_s - 1) \cdot k_r}{A_0} I_s^2 \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (87)$$

4. CHARAKTERYSTYCZNE ZALEŻNOŚCI W UKŁADZIE NAPĘDOWYM O NASYCONĘJ KOTWICY

4.1. Wiadomości wstępne

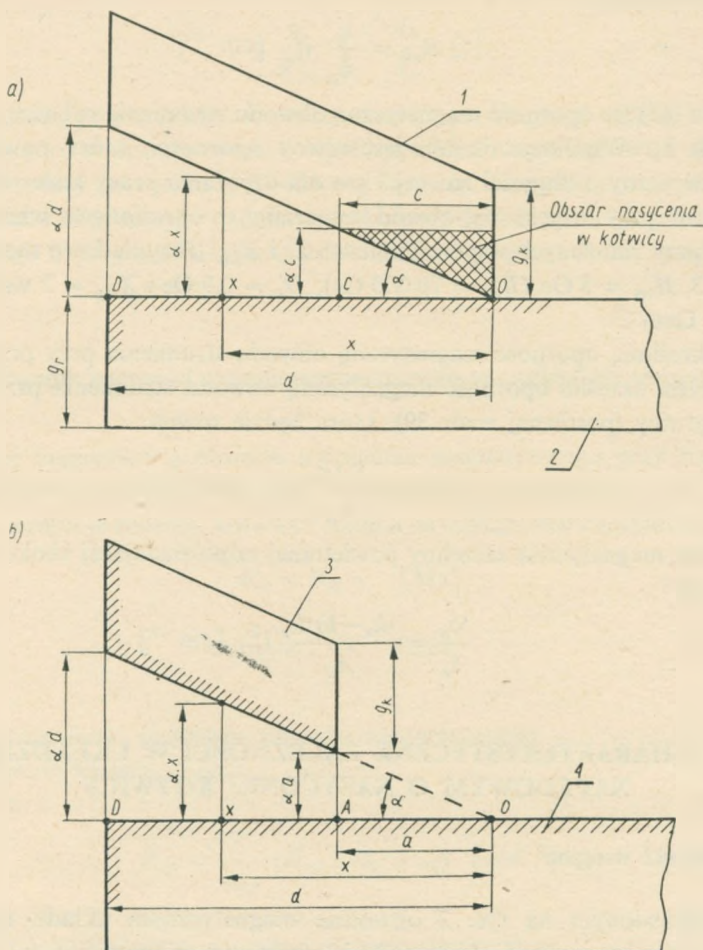
W przedstawionym na rys. 2 obwodzie magnetycznym układu napędowego o nasycanej kotwicy występują dwa rodzaje szczelin, a mianowicie:

a) szczelina powietrzna (por. rys. 11a) pomiędzy ramionami jarzma a ramionami kotwicy.

W przypadku bezpośredniego zetknięcia się kotwicy z jarzmem dla małych wartości strumienia magnetycznego oporność przejścia między nimi jest bliska zeru.

Przy wzroście strumienia przechodzącego przez daną szczelinę w miejscu zetknięcia się kotwicy z jarzmem wystąpi powiększające się nasycenie materiału kotwicy, które spowoduje zwiększenie się oporności magnetycznej tej szczeliny.

Dla uproszczenia założono, że omawiane nasycenie występuje tylko w kotwicy. W rzeczywistości to nasycenie wystąpi i w ramionach jarzma, ale w znacznie mniejszym stopniu. Materiał ramienia jarzma znajduje się po obu stronach linii zetknięcia kotwicy z jarzmem, gdy tymczasem materiał kotwicy znajduje się tylko po jednej stronie tej linii. Poza tym istnieją zjawiska brzegowe, które znacznie zmniejszają nasycenie w ramieniu jarzma.

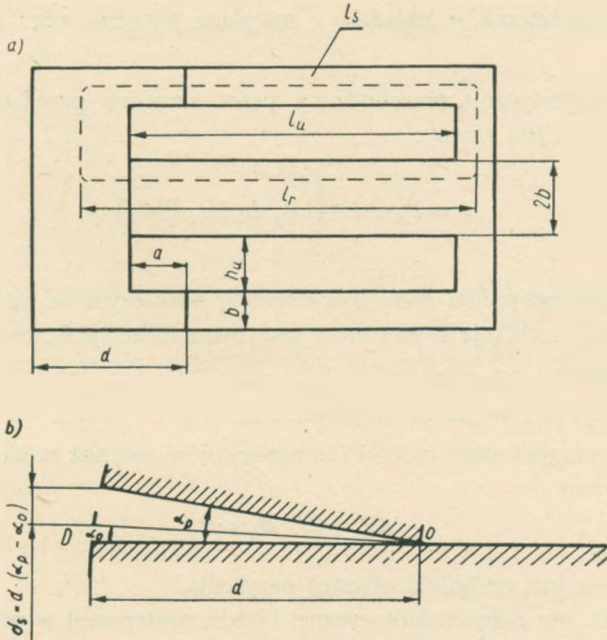


Rys. 11. Szczeliny powietrzne w rozpatrywanym obwodzie magnetycznym

a) szczelina o zależnej oporności, b) szczelina o niezależnej oporności

1 — ramię kotwicy, 2 — ramię jarzma, 3 — kotwica, 4 — rdzeń, 0 — oś obrotu kotwicy

W dalszych rozważaniach założono, że spadek siły magnetomotorycznej na całej długości rozpatrywanej szczeliny łącznie z obszarem nasycenia (pole zakreślone na rys. 11a) ma jednakową wartość. W dalszym tekście artykułu taka szczelina z nasyceniem kotwicy będzie nazywana zależną szczeliną powietrzną;



Rys. 12. Wymiary w układzie napędowym o nasycanej kotwicy

- a) l_s — długość linii sił strumienia roboczego
 l_r — długość rdzenia
 h_u — wysokość uzwojenia
 l_u — długość uzwojenia
 $l_u = 2l_r + 2h_u + b$
 $l_r = 0,42l_s$
 b — szerokość ramienia jarzma
 $l_r = l_u + h_u$
 $l_u = 0,35l_s$
- b) δ_s — skok kotwicy
 α_0 — kąt nachylenia kotwicy w stanie pracy
 α_p — kąt nachylenia kotwicy w stanie spoczynku
 O — oś obrotu kotwicy

b) szczelina powietrzna między rdzeniem a środkiem kotwicy (por. rys. 11b).

W szczelinie tej nie wystąpi nasycenie w kotwicy. W dalszych rozważaniach taka szczelina bez nasycenia kotwicy została nazwana niezależną szczeliną powietrzną.

Uwaga: Możliwe jest także zastosowanie rozwiązania układów napędowych, w których kotwica nie ma wcięcia (wymiar $a = 0$). W tym przypadku w szczelinie tej występuje analogiczne nasycenie, jak przy szczelinie wyżej wymienionej (pkt. a).

W dalszym ciągu zostaną rozpatrzone zasadnicze zależności w wyżej wymienionych szczelinach powietrznych oraz dwa obwody magnetyczne, z których jeden

będzie zawierał tylko zależne szczeliny powietrzne (z nasycaniem kotwicy), drugi natomiast będzie zawierał oba rodzaje wyżej wymienionych szczelin. Na rys. 12 podano wymiary przyjmowane dalej w rozważanych przykładach.

4.2. Szczelina powietrzna w układzie z nasyconą kotwicą, tzw. szczelina zależna

Strumień magnetyczny przechodzący przez szczelinę przedstawioną schematycznie na rys. 12a jest równy:

$$\Phi = B_n \cdot c \cdot b + \int_c^d B_x \cdot b \cdot dx \quad [\text{Mx}] \quad (88)$$

gdzie

B_n — indukcja nasycenia materiału kotwicy, przy czym na całym odcinku nasycenia c indukcja w powietrzu jest równa indukcji B_n , w Gs,

b, c — wymiary na rys. 11a,

B_x — indukcja w powietrzu w punkcie x .

Spadek siły magnetomotorycznej (amperozwojów) wzdłuż ramienia kotwicy jest jednakowy i równy

$$AZ = 0,8 \cdot B_n \cdot c \cdot \alpha \quad (89)$$

gdzie iloczyn $c \cdot \alpha$ jest grubością obszaru nasycenia.

Ten sam spadek siły magnetomotorycznej będzie występował w punkcie X , a mianowicie:

$$AZ = 0,8 \cdot B_x \cdot x \cdot \alpha \quad (90)$$

Wobec tego indukcja B_x w punkcie X będzie równa:

$$B_x = B_n \cdot \frac{c}{x} \quad [\text{Gs}] \quad (91)$$

Podstawiając określoną wartość B_x do wyrażenia (88) oraz całkując otrzymamy, że strumień przechodzący przez szczelinę będzie równy:

$$\Phi_r = B_n \cdot c \cdot b \cdot \left(1 + \ln \frac{d}{c} \right) \quad [\text{Mx}] \quad (92)$$

Natomiast ze wzoru (89) można określić odcinek nasycenia c , który będzie równy:

$$c = \frac{1,25 \cdot AZ}{\alpha \cdot B_n} \quad [\text{cm}] \quad (93)$$

Poza tym oporność magnetyczna omawianej szczeliny, jako stosunek spadku am-

perozwojów do strumienia, będzie równa:

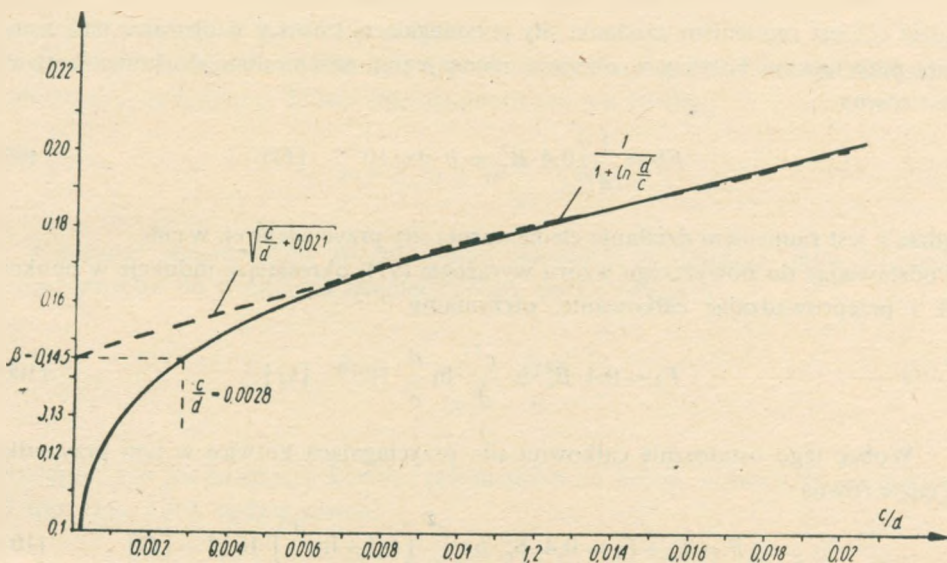
$$R_{\mu} = \frac{1,25 \cdot AZ}{\Phi} = \frac{\alpha}{b} \cdot \frac{1}{1 + \ln \frac{d}{c}} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (94)$$

Wyrażenie $\frac{1}{1 + \ln \frac{d}{c}}$ okazało się niewygodne do dalszych rozważań i wprowadzono

następujące przybliżenie

$$\frac{1}{1 + \ln \frac{d}{c}} \approx \sqrt{\frac{c}{d} + \beta^2} \quad (95)$$

Na rysunku 13 podano przebieg wyżej podanych wyrażeń w zależności od stosunku c/d . Zgodnie ze wzorem (94) oporność szczeliny przy $c = 0$ powinna być również równa zero. Jednak praktycznie nie osiągnie się tego, aby kotwica na całej



Rys. 13. Przebieg parametru oporności magnetycznej (ściśły i przybliżony)

swojej długości dotykała jarzma. Poza tym przy małych nasyceniach przenikalność stali jest znacznie mniejsza. Wobec tego wydaje się słuszne, aby omawiane przybliżone wyrażenie przy $c = 0$ miało pewną określoną wartość, oznaczoną przez β .

W związku z powyższym oporność szczeliny powietrznej zmienia się w granicach określonych przez krańcowe wartości, a mianowicie:

minimalna oporność szczeliny powietrznej ($c = 0$)

$$R_{\mu s} = \frac{\alpha}{b} \cdot \beta \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (96)$$

gdzie β — współczynnik początkowej oporności szczeliny równy dla pojedynczej szczeliny 0,145;

maksymalna oporność szczeliny ($c = d$)

$$R_{\mu s} = \frac{\alpha}{b} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (97)$$

Rozpatrywana szczelina została podzielona na obszar nasycenia o długości c i obszar nienasycenia o długości $d - c$. Siła przyciągająca kotwicę w obszarze nasycenia przeniesiona do końca kotwicy (punkt D na rys. 11a) jest równa (por. wzór 40):

$$F_a = 0,4 \cdot B_n^2 \cdot \frac{b \cdot c^2}{2 \cdot d} \cdot 10^{-4} \quad [\text{G}] \quad (98)$$

gdzie $c/2$ jest ramieniem działania siły przyciągającej kotwicy w obszarze nasycenia. Siła przyciągania kotwicy w obszarze nienasycenia przeniesiona do końca kotwicy jest równa:

$$F_b = \frac{1}{d} \int_c^d 0,4 \cdot B_x^2 \cdot x \cdot b \cdot dx \cdot 10^{-4} \quad [\text{G}] \quad (99)$$

gdzie x jest ramieniem działania elementarnej siły przyciągającej, w cm.

Podstawiając do powyższego wzoru wyrażenie (91), określające indukcję w punkcie X i przeprowadzając całkowanie, otrzymamy

$$F_b = 0,4 \cdot B_n^2 \cdot b \cdot \frac{c^2}{d} \cdot \ln \frac{d}{c} \cdot 10^{-4} \quad [\text{G}] \quad (100)$$

Wobec tego ostatecznie całkowita siła przyciągająca kotwicę w tym przypadku będzie równa:

$$F = F_a + F_b = 0,4 \cdot B_n^2 \cdot b \cdot \frac{c^2}{d} \cdot \left(0,5 + \ln \frac{d}{c} \right) \cdot 10^{-4} \quad [\text{G}] \quad (101)$$

a po wprowadzeniu do powyższego wzoru indukcji B_n , określonej na podstawie wzoru (92), otrzymamy, że siła przyciągająca kotwicę będzie równa:

$$F = 0,4 \cdot \Phi_v^2 \cdot \frac{1}{b \cdot d} \cdot \frac{0,5 + \ln \frac{d}{c}}{\left(1 + \ln \frac{d}{c} \right)^2} \cdot 10^{-4} \quad [\text{G}] \quad (102)$$

4.3. Szczelina powietrzna w układzie z nie nasyconą kotwicą, tzw. szczelina niezależna

Strumień magnetyczny przechodzący przez szczelinę przedstawioną na rys. 11b jest równy:

$$\Phi = \int_a^d B_x \cdot b \cdot dx \quad [\text{Mx}] \quad (103)$$

Oznaczając przez B_a indukcję magnetyczną w punkcie A , spadek siły magneto-motorycznej na rozpatrywanej szczelinie będzie równy:

$$AZ = 0,8 \cdot B_a \cdot a \cdot \alpha \quad (104)$$

gdzie B_a — indukcja magnetyczna w punkcie A , która powinna być mniejsza od indukcji nasycenia materiału kotwicy B_n .

Następnie indukcja magnetyczna w punkcie X będzie równa:

$$B_x = \frac{AZ_a}{0,8 \cdot x \cdot \alpha} = B_a \cdot \frac{a}{x} \quad [\text{Gs}] \quad (105)$$

gdzie $x \cdot \alpha$ — odległość kotwicy od rdzenia.

Podstawiając określoną indukcję w punkcie X do wzoru (103) i przeprowadzając całkowanie, otrzymamy, że strumień magnetyczny jest równy

$$\Phi = B_a \cdot a \cdot b \cdot \ln \frac{d}{a} \quad [\text{Mx}] \quad (106)$$

Oporność magnetyczna rozpatrywanej szczeliny powietrznej, jako stosunek amperozwojów do strumienia magnetycznego, będzie równa:

$$R_\mu = \frac{\alpha}{b} \cdot \frac{1}{\ln \frac{d}{a}} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (107)$$

Następnie siła przyciągająca kotwicę przeniesiona do brzegu kotwicy, tj. do punktu D (por. rys. 12b), będzie równa:

$$F = \frac{1}{d} \int_a^d 0,4 \cdot B_x^2 \cdot b \cdot x \cdot dx \cdot 10^{-4} \quad [\text{G}] \quad (108)$$

gdzie x jest ramieniem działania elementarnej siły.

Podstawiając wyrażenie (105), określające indukcję B_a , i przeprowadzając całkowanie otrzymamy, że siła przyciągająca kotwicę będzie równa:

$$F = 0,4 \cdot B_a^2 \cdot \frac{b \cdot a^2}{d} \ln \frac{d}{a} \cdot 10^{-4} \quad [\text{G}] \quad (109)$$

Po określeniu ze wzoru (106) indukcji B_n i podstawieniu jej do wzoru (109) otrzymamy ostatecznie, że siła przyciągająca kotwicę będzie równa:

$$F = 0,4 \cdot \Phi_r^2 \frac{1}{b \cdot d} \cdot \frac{1}{\ln \frac{d}{a}} \cdot 10^{-4} \quad [\text{G}] \quad (110)$$

4.4. Układ szeregowy szczelin powietrznych

Zgodnie z rysunkiem 2b w rozpatrywanym obwodzie magnetycznym są trzy szczeliny powietrzne, z których dwie ze względu na równoległą pracę (strumień magnetyczny rozdziela się na dwie równe części) mogą być potraktowane jako jedna szczelina o podwójnej szerokości b . Szczelina ta znajduje się pomiędzy kotwicą a jarzmem, przy czym w szczelinie tej z uwagi na bezpośrednie zetknięcie się ramion kotwicy z ramionami jarzma zawsze występuje miejscowe nasycenie materiału kotwicy. Pozostała trzecia szczelina między środkiem kotwicy a rdzeniem może być szczeliną niezależną, tj. bez nasycenia kotwicy (wymiar wcięcia kotwicy $a > 0$), lub też szczeliną zależną, tj. z nasyceniem kotwicy (wymiar $a = 0$, kotwica bezpośrednio dotyka rdzenia). W związku z powyższym w rozpatrywanym obwodzie magnetycznym mogą być dwa przypadki, a mianowicie:

- szczeliny powietrzne między kotwicą a jarzmem oraz między kotwicą a rdzeniem są szczelinami zależnymi; w tym przypadku są aktualne wzory wyprowadzone w punkcie 4.2, przy uwzględnieniu szeregowego połączenia dwóch jednakowych szczelin, które mogą być zastąpione przez jedną szczelinę o zmniejszonej do połowy szerokości;
- szczelina powietrzna między kotwicą a jarzmem jest szczeliną zależną, a szczelina między kotwicą a rdzeniem (por. punkt 4.3) jest szczeliną niezależną.

Ten ostatni przypadek wymaga bardziej szczegółowego omówienia podanego poniżej. Przy szeregowym połączeniu szczelin omówionych w punktach 4.2 i 4.3 z uwagi na jednakowy przebiegający przez nie strumień magnetyczny można napisać następujące równanie (por. wzory 92 i 106)

$$B_n \cdot c \cdot b \left(1 + \ln \frac{d}{c} \right) = B_a \cdot a \cdot b \cdot \ln \frac{d}{a} \quad (111)$$

Z równania 111 można określić indukcję B_a , która będzie równa:

$$B_a = B_n \cdot \frac{1 + \ln \frac{d}{c}}{\frac{d}{c}} \cdot \frac{d}{a \cdot \ln \frac{d}{a}} \quad [\text{Gs}] \quad (112)$$

Ze względu na to, że indukcja B_a nie może być większa od indukcji nasycenia B_n , można napisać następującą nierówność

$$\frac{\ln \frac{d}{a}}{\frac{d}{a}} \geq \frac{1 + \ln \frac{d}{c}}{\frac{d}{c}} \quad (113)$$

Maksimum wyrażenia $\frac{\ln \frac{d}{a}}{\frac{d}{a}}$ występuje przy wartości stosunku $\frac{d}{a} = e$, przy

czym wartość tego maksimum wynosi $1 : e = 0,368$. W związku z powyższym stosunek długości kotwicy do odcinka nasycenia musi być większy od 8,52, tj. $c < 0,117 d$. Należy zwrócić uwagę, że przy większej wartości odcinka nasycenia c w ramionach kotwicy wystąpi dodatkowo nasycenie w środkowej części kotwicy współpracującej z rdzeniem. Jednak z uwagi na ograniczenie strumienia roboczego przez przekrój jarzma (rdzenia) odcinek nasycenia c praktycznie nie przekracza wartości $0,02 \cdot d$. Wobec tego przy spełnieniu nierówności (113) stosunek długości wcięcia do długości kotwicy może się zmieniać w granicach

$$0,03 < \frac{a}{d} < 0,8 \quad (114)$$

Amperozwoje potrzebne do wywołania strumienia roboczego Φ_r będą równe sumie amperozwojów potrzebnych dla obu rodzajów szczelin (por. wzory 89 i 104), a mianowicie:

$$AZ = 0,8 \cdot B_n \cdot c \cdot \alpha + 0,8 \cdot B_a \cdot a \cdot \alpha \quad (115)$$

Wprowadzając do powyższego wyrażenia indukcję nasycenia B_n według wzoru (92) i indukcję B_a według wzoru (106) otrzymamy

$$AZ = 0,8 \cdot \Phi_r \cdot \frac{\alpha}{b} \left(\frac{1}{1 + \ln \frac{d}{c}} + \frac{1}{\ln \frac{d}{a}} \right) \quad (116)$$

W związku z powyższym oporność magnetyczna szeregowo połączonych omawianych dwóch rodzajów szczelin będzie równa:

$$R_{\mu s} = \frac{\alpha}{b} \cdot \left(\frac{1}{1 + \ln \frac{d}{c}} + \frac{1}{\ln \frac{d}{a}} \right) [\text{cm}^{-1}] \quad (117)$$

W celu uniknięcia osobnego rozpatrywania obwodu magnetycznego zawierającego raz dwie szczeliny zależne, tj. z nasyconą kotwicą, a drugi raz obwodu magnetycznego

zawierającego szczelinę zależną i szczelinę niezależną, wprowadzimy liczbę γ_z , określającą liczbę szczelin zależnych. Liczba γ_z w pierwszym przypadku ma wartość 2, a w drugim przypadku wartość 1. W związku z powyższym wzór (117), określający oporność magnetyczną dwóch szeregowo połączonych szczelin, będzie się przedstawiał:

$$R_{\mu s} = \frac{\alpha}{b} \cdot \left[\frac{\gamma_z}{1 + \ln \frac{d}{c}} + \frac{(2 - \gamma_z)}{\ln \frac{d}{a}} \right] \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (118)$$

Należy zwrócić uwagę, że przy podstawieniu $\gamma_z = 1$ otrzymujemy wzór (117), a po podstawieniu $\gamma_z = 2$ otrzymujemy dwukrotną wartość wzoru (94) (dwie jednakowe szczeliny zależne połączone w szereg). Wprowadzając uproszczenie określone wyrażeniem (95) otrzymamy analogicznie:

minimalna oporność szczelin powietrznych (por. wzór 96) będzie równa:

$$R_{\mu s} = \frac{\alpha}{b} \cdot \left[\beta \cdot \gamma_z + \frac{(2 - \gamma_z)}{\ln \frac{d}{a}} \right] \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (119)$$

a maksymalna oporność szczelin powietrznych (por. wzór 97) będzie równa:

$$R_{\mu s} = \frac{\alpha}{b} \cdot \left[\gamma_z + \frac{(2 - \gamma_z)}{\ln \frac{d}{a}} \right] \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (120)$$

4.5. Krańcowe stany obwodu magnetycznego

W celu ułatwienia dalszych rozważań wprowadzono dla szczeliny zależnej pojęcie maksymalnego strumienia roboczego Φ_{max} , który występuje w przypadku, kiedy odcinek nasycenia c jest równy długości kotwicy d (por. rys. 11a). Jest to przypadek czysto teoretyczny, gdyż z uwagi na znacznie mniejszy przekrój jarzma (rdzenia) w stosunku do przekroju szczeliny nasycenie w rozpatrywanym obwodzie magnetycznym wystąpiłoby przy znacznie mniejszej wartości strumienia roboczego. Maksymalny strumień roboczy będzie równy:

$$\Phi_{rmax} = B_n \cdot 2 \cdot b \cdot d \quad [\text{Mx}] \quad (121)$$

gdzie $2b$, d — wymiary według rys. 12.

Następnie w tym samym stanie całkowitego nasycenia kotwicy oporność obwodu

magnetycznego przy danym położeniu kotwicy będzie równa (por. wzory 51, 52, 118):

$$R_{\mu} = R_{\mu z} + \frac{\alpha \cdot (2 - \gamma_z)}{2 \cdot b \cdot \ln \frac{d}{a}} + \frac{\alpha \cdot \gamma_z}{2 \cdot b} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (122)$$

gdzie α — kąt nachylenia kotwicy w stosunku do jarzma (rdzenia), w radianach. Uwaga: Oporność niezależnej szczeliny powietrznej, tj. między rdzeniem a środkiem kotwicy (drugi składnik wzoru 122) w przypadku $a > 0$ i $\gamma_z = 1$ z uwagi na niezależność jej wartości od strumienia magnetycznego należy traktować podobnie jak oporność $R_{\mu z}$.

W związku z powyższym maksymalna oporność obwodu magnetycznego będzie równa:

— przy kotwicy w stanie spoczynku

$$R_{\mu \max} = R_{\mu z} + \frac{\alpha_p \cdot (2 - \gamma_z)}{2 \cdot b \cdot \ln \frac{d}{a}} + \frac{\alpha_p \cdot \gamma_z}{2 \cdot b} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (123)$$

— przy kotwicy w stanie pracy

$$R'_{\mu \max} = R_{\mu z} + \frac{\alpha_0 \cdot (2 - \gamma_z)}{2 \cdot b \cdot \ln \frac{d}{a}} + \frac{\alpha_0 \cdot \gamma_z}{2 \cdot b} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (124)$$

gdzie α_p i α_0 — kąty nachylenia kotwicy w stanie spoczynku i w stanie pracy, w radianach.

Następnie wprowadzimy maksymalny współczynnik wzrostu oporności obwodu magnetycznego przy przejściu kotwicy z pozycji pracy do pozycji spoczynkowej, a mianowicie:

$$k_{s \max} = \frac{R_{\mu \max}}{R'_{\mu \max}} \quad (125)$$

Oporność magnetyczna zależnej szczeliny powietrznej, tj. między ramionami kotwicy a ramionami jarzma, zmienia się w zależności od długości odcinka nasycenia c . W rozpatrywanym przypadku całkowitego nasycenia kotwicy oporność zależnej szczeliny będzie równa:

— przy kotwicy w stanie spoczynku (patrz uwaga do wzoru 122)

$$R_{\mu s \max} = \frac{\alpha_p \cdot \gamma_z}{2 \cdot b} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (126)$$

— przy kotwicy w stanie pracy

$$R'_{\mu s \max} = \frac{\alpha_0 \cdot \gamma_z}{2 \cdot b} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (127)$$

Powyżej były omawiane oporności obwodu magnetycznego w teoretycznym stanie całkowitego nasycenia kotwicy. Jednak jest jeszcze drugi stan krańcowy, w którym kotwica nie jest wcale nasycona. Zgodnie ze wzorem (120) podanym w punkcie 4.4, przybliżona minimalna oporność obwodu magnetycznego będzie równa:

— dla spoczynkowego położenia kotwicy

$$R_{\mu min} = R_{\mu z} + \frac{\alpha_p \cdot (2 - \gamma_z)}{2 \cdot b \cdot \ln \frac{d}{a}} + \beta \cdot \frac{\alpha_p \cdot \gamma_z}{2 \cdot b} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (128)$$

— dla kotwicy w stanie pracy

$$R'_{\mu min} = R_{\mu z} + \frac{\alpha_0 \cdot (2 - \gamma_z)}{2 \cdot b \cdot \ln \frac{d}{a}} + \beta \cdot \frac{\alpha_0 \cdot \gamma_z}{2 \cdot b} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (129)$$

gdzie współczynnik minimalnej oporności szczeliny powietrznej β jest równy 0,145. To samo będzie się odnosiło do oporności zależnej szczeliny powietrznej, której minimalna wartość będzie równa:

— dla spoczynkowego położenia kotwicy

$$R_{\mu s min} = \beta \cdot \frac{\alpha_p \cdot \gamma_z}{2 \cdot b} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (130)$$

— dla kotwicy w stanie pracy

$$R'_{\mu s min} = \beta \cdot \frac{\alpha_0 \cdot \gamma_z}{2 \cdot b} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (131)$$

Poza tym minimalny współczynnik wzrostu oporności przy przejściu kotwicy z jednego krańcowego położenia w drugie wyniesie

$$k_{s min} = \frac{R_{\mu min}}{R'_{\mu min}} \quad (132)$$

W omawianym stanie całkowitego nasycenia kotwicy potrzebne amperozwoje dla wywołania maksymalnego strumienia magnetycznego będą równe:

— dla spoczynkowego położenia kotwicy

$$AZ_{max} = 0,8 \cdot \Phi_{r max} \cdot R_{\mu max} \quad (133)$$

— dla kotwicy w stanie pracy

$$AZ'_{max} = 0,8 \cdot \Phi_{r max} \cdot R'_{\mu max} \quad (134)$$

przy czym stosunek amperozwojów maksymalnych dla obu położen kotwicy będzie

równy maksymalnemu współczynnikowi wzrostu oporności obwodu magnetycznego, a mianowicie:

$$k_{smax} = \frac{AZ_{max}}{AZ'_{max}} \quad (135)$$

W celu ułatwienia dalszych rozważań wprowadzimy pojęcie względnych wartości uprzednio omówionych wielkości. Wielkościami, które będą stanowić punkty odniesienia, będą:

- roboczy strumień maksymalny Φ_{rmax} ,
- maksymalna oporność obwodu magnetycznego przy nie przyciągniętej kotwicy $R_{\mu max}$,
- maksymalna oporność obwodu magnetycznego przy przyciągniętej kotwicy $R'_{\mu max}$.

Wobec tego przejściowa względna wartość strumienia roboczego będzie równa:

$$\varphi_r = \frac{\Phi_r}{\Phi_{rmax}} \quad (136)$$

Względna minimalna oporność obwodu magnetycznego przy nie przyciągniętej kotwicy będzie równa:

$$r_{\mu min} = \frac{R_{\mu min}}{R_{\mu max}} \quad (137)$$

Względna minimalna oporność przy przyciągniętej kotwicy będzie równa:

$$r'_{\mu min} = \frac{R'_{\mu min}}{R'_{\mu max}} \quad (138)$$

Względna maksymalna oporność magnetyczna zależnej szczeliny powietrznej będzie równa:

- przy nie przyciągniętej kotwicy

$$r_{\mu s max} = \frac{R_{\mu s max}}{R_{\mu max}} \quad (139)$$

- przy przyciągniętej kotwicy

$$r'_{\mu s max} = \frac{R'_{\mu s max}}{R'_{\mu max}} \quad (140)$$

Względna minimalna oporność magnetyczna zależnej szczeliny powietrznej:

- przy kotwicy nie przyciągniętej

$$r_{\mu s min} = \frac{R_{\mu s min}}{R_{\mu max}} \quad (141)$$

— przy kotwicy przyciągniętej

$$r'_{\mu s min} = \frac{R'_{\mu s min}}{R'_{\mu max}} \quad (142)$$

Biorąc pod uwagę wzory (125), (132), (137), (138) otrzymamy, że stosunek względnych oporności minimalnych w obu położeniach kotwicy jest równy:

$$\frac{r_{\mu min}}{r'_{\mu min}} = \frac{k_{s min}}{k_{s max}} \quad (143)$$

Następnie stosunek względnych oporności maksymalnych zależnej szczeliny powietrznej w obu położeniach kotwicy jest równy (por. wzory 125, 126, 127, 139, 140):

$$\frac{r_{\mu s max}}{r'_{\mu s max}} = \frac{\alpha_p}{k_{s max} \cdot \alpha_0} \quad (144)$$

4.6. Roboczy strumień magnetyczny

Wprowadzając do wzoru (92) uprzednio ustalony maksymalny strumień $\Phi_{r max}$ (por. wzór 121) otrzymamy:

$$\Phi_r = \Phi_{r max} \cdot \frac{c}{d} \cdot \left(1 + \ln \frac{d}{c}\right) \quad [\text{Mx}] \quad (145)$$

Uwaga. Szerokość szczelin zgodnie z rys. 13 wynosi 2b. Następnie biorąc pod uwagę uprzednio wprowadzone uproszczenie (por. wzór 95), otrzymamy, że względna wartość strumienia roboczego (por. wzór 136) będzie równa:

$$\varphi_r = \frac{c}{d} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{c}{d} + \beta^2}} \quad (146)$$

Rozwiązując powyższe równanie w stosunku do c/d otrzymamy, że szukany stosunek c/d jest równy:

$$\frac{c}{d} = 0,5 \cdot \varphi_r^2 \left[1 - \sqrt{1 + 4 \cdot \left(\frac{\beta}{\varphi_r}\right)^2} \right] \quad (147)$$

a po wprowadzeniu uproszczenia

$$4 \cdot \left(\frac{\beta}{\varphi_r}\right)^2 + 1 \approx 4 \cdot \left(\frac{\beta}{\varphi_r}\right)^2 \quad (148)$$

otrzymamy, że stosunek odcinka nasycenia do długości kotwicy jest równy:

$$\frac{c}{d} \approx \varphi_r \cdot (\beta + 0,5 \cdot \varphi_r) \quad (149)$$

a wyrażenie (por. wzór 145)

$$1 + \ln \frac{d}{c} = \frac{1}{\beta + 0,5 \cdot \varphi_r} \quad (150)$$

Uwaga. Przy wartości $\varphi_r < 0,1$ popełniony błąd jest $< 4\%$.

Zgodnie ze wzorem określającym oporność szczelin powietrznych (zależnej i niezależnej) ogólna oporność obwodu magnetycznego będzie równa:

$$R_{\mu r} = R_{\mu z} + \frac{\alpha}{2 \cdot b} \cdot \left[\frac{\gamma_z}{1 + \ln \frac{d}{c}} + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}} \right] \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (151)$$

Mnożąc powyższe wyrażenie przez $0,8 \cdot \Phi_r$, otrzymamy amperozwoje potrzebne do wzbudzenia tego strumienia, a mianowicie:

$$AZ = 0,8 \cdot \left[\left(R_{\mu z} + \frac{d \cdot (2 - \gamma_z)}{2 \cdot b \cdot \ln \frac{d}{a}} \right) \cdot \Phi_r + \frac{\alpha \cdot \gamma_z}{2 \cdot b} \cdot \frac{1}{1 + \ln \frac{d}{c}} \cdot \Phi_r \right] \quad (152)$$

Wprowadzając do powyższego wyrażenia wzór (133) na AZ_{max} , wzór (145) na Φ_r , wzór (136) na φ_r , wzór (137) na $r_{\mu min}$, wzór (139) na $r_{\mu s max}$ otrzymamy, że amperozwoje potrzebne do wywołania względnej wartości strumienia φ_r są równe:

$$AZ = AZ_{max} (r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_r) \cdot \varphi_r \quad (153)$$

Następnie przy wykorzystaniu wyżej podanych zależności otrzymamy, że oporność obwodu magnetycznego (por. wzór 151) będzie równa:

$$R_{\mu r} = R_{\mu max} (r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_r) \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (154)$$

a po usunięciu wartości względnych:

$$R_{\mu r} = R_{\mu min} + 0,5 \cdot R_{\mu s max} \cdot \frac{\Phi_r}{\Phi_{r max}} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (155)$$

Stwierdzamy zatem, że oporność obwodu magnetycznego przy określonej wartości strumienia równa się wartości minimalnej tej oporności powiększonej o połowę maksymalnej wartości oporności zależnej szczeliny powietrznej, sprowadzonej do maksymalnej wartości strumienia.

Współczynniki bezpieczeństwa określone dla układu napędowego z nie nasycaną kotwicą (por. punkt 3.1 i wzory 44, 45, 46, 47) mogą być zastosowane również dla omawianego układu napędowego z nasycaną kotwicą. Jednak w przypadku

nasyconej kotwicy amperozwoje potrzebne do wywołania strumienia nie są proporcjonalne do tego strumienia (por. wzór 153). Na podstawie uprzednio ustalonych zależności można określić zależność współczynnika bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do ustalonej wartości amperozwojów X_{pi} od współczynnika bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do ustalonej wartości strumienia $X_{p\Phi}$, a mianowicie

$$X_{pi} = \frac{(r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_{ru}) \cdot \varphi_{ru}}{(r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_{rp}) \cdot \varphi_{rp}} \quad (156)$$

oraz

$$X_{pi} = \left(1 + \frac{0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot (X_{p\Phi} - 1) \cdot \varphi_{rp}}{r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_{rp}} \right) \cdot X_{p\Phi} \quad (157)$$

Należy zaznaczyć, że różnica między wartościami współczynników $X_{p\Phi}$ i X_{pi} praktycznie nie przekracza 15%. Następnie współczynnik wzrostu strumienia roboczego przy stałych amperozwojach, przy przejściu kotwicy z położenia spoczynkowego do pozycji pracy, będzie równy (por. wzór 39).

$$k_s = \frac{\Phi'_{ru}}{\varphi_{ru}} = \frac{\varphi'_{ru}}{\varphi_{ru}} \quad (158)$$

przy $AZ_u = \text{konst.}$

Biorąc pod uwagę wzór (125), określający maksymalną wartość współczynnika $k_{s max}$, można napisać równanie

$$(r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_{ru}) \cdot \varphi_{ru} \cdot k_{s max} = (r'_{\mu min} + 0,5 \cdot r'_{\mu s max} \cdot \varphi'_{ru}) \cdot \varphi'_{ru} \quad (159)$$

Po wprowadzeniu do powyższego równania uprzednio wymienionego współczynnika k_s otrzymamy równanie

$$(r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_{ru}) k_{s max} = k_s \cdot r'_{\mu min} + 0,5 \cdot r'_{\mu s max} \cdot k_s^2 \cdot \varphi_{ru} \quad (160)$$

z którego w przybliżeniu można określić szukany współczynnik wzrostu k_s , a mianowicie

$$k_s = \frac{r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_{ru}}{r'_{\mu min}} \cdot k_{s max} \quad (161)$$

4.7. Szczątkowy strumień magnetyczny

Zgodnie z treścią punktu 3.3 oraz wzorem (151) i wzorem (150) oporność obwodu magnetycznego przy przyciągniętej kotwicy po odłączeniu od źródła zasilania będzie równa

$$R'_{\mu k} = \frac{\alpha_0}{2 \cdot b} \left[\gamma_z \cdot (\beta + 0,5 \cdot \varphi'_k) + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}} \right] [\text{cm}^{-1}] \quad (162)$$

Uwaga. Z uwagi na bardzo dużą przenikalność stali w rozpatrywanym stanie obwodu magnetycznego oporność $R_{\mu z}$ została pominięta.

Wprowadzając do wyrażenia (47) określoną wzorami (54) i (152) wartość strumienia szczątkowego otrzymamy, że współczynnik bezpieczeństwa zwalniania jest równy

$$X_{0\Phi} = \frac{\Phi'_{r0}}{H_k \cdot l_s} \cdot \frac{\alpha_0}{2 \cdot b} \left[\gamma_z \cdot (\beta + 0,5 \cdot \varphi'_k) + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}} \right] \quad (163)$$

Z powyższego wzoru przy założonej wartości współczynnika bezpieczeństwa zwalniania można określić kąt nachylenia kotwicy w czasie pracy α_0 , a mianowicie:

$$\alpha_0 = \frac{H_k \cdot X_{0\Phi}}{\Phi'_{r0}} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot l_s}{\gamma_z (\beta + 0,5 \cdot \varphi'_k) + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}}} \quad (164)$$

4.8. Siła przyciągająca kotwicę

Biorąc pod uwagę wzór (102), określający siłę przyciągania w zależnej szczelinie powietrznej, tj. z nasyconą kotwicą, oraz wzór (110), określający siłę przyciągania w niezależnej szczelinie powietrznej, tj. w układzie z nie nasyconą kotwicą, sumaryczna siła przyciągająca kotwicę przy uwzględnieniu wymiarów podanych na rys. 2b będzie równa

$$F = 0,4 \cdot \varphi_r^2 \cdot \frac{10^{-4}}{2 \cdot b \cdot d} \left[\frac{0,5 + \ln \frac{d}{c}}{\left(1 + \ln \frac{d}{c}\right)^2} \cdot \gamma_z + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}} \right] \quad [\text{G}] \quad (165)$$

Biorąc pod uwagę przybliżenie przyjęte we wzorze (150), będzie można napisać

$$\frac{0,5 + \ln \frac{d}{c}}{\left(1 + \ln \frac{d}{c}\right)^2} \approx (\beta + 0,5 \cdot \varphi_r) \cdot [1 + 0,5 \cdot (\beta + 0,5 \cdot \varphi_r)] \quad (166)$$

Należy zwrócić uwagę, że wyżej wymieniony z prawej strony równania iloczyn w miarę zmian względnej wartości strumienia φ_r , mało zmienia swoją wartość. Obliczono, że przy $\beta = 0,145$ i zmianach $0,001 < \varphi_r < 0,06$ omawiany iloczyn waha się od 0,135 do 0,16. W związku z tym w dalszych rozważaniach przyjęto, że iloczyn

ten jest równy $\beta = 0,145$. Wobec tego siła przyciągająca kotwicę będzie równa:

$$F = 0,2 \cdot \Phi_r^2 \cdot \frac{10^{-4}}{b \cdot d} \left[\gamma_z \cdot \beta + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}} \right] \quad [\text{G}] \quad (167)$$

W powyższym wzorze składnik $\gamma_z \cdot \beta$ jest proporcjonalny do siły przyciągania w zależnej szczelinie, natomiast składnik zawierający $\ln \frac{d}{a}$ jest proporcjonalny do siły przyciągania w niezależnej szczelinie. Należy zwrócić uwagę, że na przykład przy wartości $a = \frac{d}{e} = 0,308 \cdot d$ około 87% ogólnej siły przyciągania dostarcza szczelina niezależna, tj. bez nasycania.

W celu określenia najkorzystniejszej długości wcięcia kotwicy, tj. wymiaru a , do wzoru (167) zamiast strumienia roboczego Φ_r , wprowadzimy:

$$\Phi_r = \frac{1,25 \cdot AZ}{R_{\mu \min}} \quad [\text{Mx}] \quad (168)$$

Uwaga. W celu uproszczenia przyjęto, że oporność obwodu magnetycznego równa się swojej wartości minimalnej (por. wzory 128 lub 129). Popołniony błąd (por. wzór 155) w tym przypadku jest stosunkowo niewielki.

W związku z powyższym otrzymamy, że siła przyciągania kotwicy będzie równa:

$$F = 0,3 \cdot \frac{AZ^2}{b \cdot d} \cdot \frac{\left(\beta + \frac{1}{\ln \frac{d}{a}} \right) \cdot 10^{-4}}{\left(R_{\mu z} + \frac{\alpha}{2 \cdot b \cdot \ln \frac{d}{a}} + \beta \frac{\alpha}{2 \cdot b} \right)^2} \quad [\text{G}] \quad (169)$$

$$\text{dla } \gamma_z = 1$$

gdzie α — określony kąt nachylenia kotwicy do jarzma lub rdzenia zawarty w granicach od α_0 do α_p przy $\gamma_z = 1$.

W celu określenia optimum siły F znaleziono jej pochodną w stosunku do długości wcięcia a i po przyrównaniu tej pochodnej do zera otrzymano równanie

$$\frac{\alpha}{2 \cdot b} \cdot \frac{1}{\ln \frac{d}{a}} + \beta \cdot \frac{\alpha}{2 \cdot b} = R_{\mu z} \quad (170)$$

Okazało się, że dla otrzymania maksimum siły oporności obu szczelin powietrznych niezależnej i zależnej muszą być równe oporności drogi linii sił w stali. Zachodzi

tu znany przypadek dopasowania oporności odbiornika do oporności wewnętrznej źródła prądu. Wobec tego

$$\ln \frac{d}{a} = \frac{1}{\frac{2 \cdot b}{\alpha} \cdot R_{\mu z} - \beta} \quad (171)$$

Jak widać z powyższego wzoru, najkorzystniejsza długość wcięcia a zależy od oporności magnetycznej części obwodu magnetycznego w stali i od kąta nachylenia kotwicy w stosunku do jarzma (rdzenia). Warto zwrócić uwagę, że najkorzystniejsza długość wcięcia a przy przyciągniętej kotwicy może być znacznie większa (kąt α mały), niż najkorzystniejsza długość wcięcia przy nie przyciągniętej kotwicy (kąt α duży). Ponieważ można wybrać tylko jedną wartość, przy określaniu wymiaru a należy się kierować raczej przebiegiem siły odciągającej w zależności od ruchu kotwicy. Wydaje się słuszne, aby przy niewielkim wzroście potrzebnej siły przyciągającej kotwicy dla określenia najkorzystniejszej długości wcięcia a brać stan jej spoczynku. Natomiast w przypadku dużego wzrostu potrzebnej siły w czasie ruchu kotwicy należałoby wybrać do tego celu stan pracy.

Biorąc pod uwagę wzór (167), siła przyciągania kotwicy przy strumieniu przyciągania będzie równa

$$F_p = 0,2 \cdot \Phi_{rp}^2 \cdot \frac{10^{-4}}{b \cdot d} \left[\gamma_z \cdot \beta + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}} \right] \quad [\text{G}] \quad (172)$$

Z powyższego wzoru można określić potrzebny strumień przyciągania, a mianowicie

$$\Phi_{rp} = \frac{223}{\sqrt{\gamma_z \cdot \beta + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}}}} \cdot \sqrt{F_p \cdot b \cdot d} \quad [\text{Mx}] \quad (173)$$

Po wprowadzeniu uprzednio omówionej pracy początkowej kotwicy, która jest równa (por. punkt 2.4)

$$A_p = F_p \cdot (\alpha_p - \alpha_0) \cdot d \quad [\text{Gcm}] \quad (174)$$

gdzie $\alpha_p - \alpha_0$ — ruch kątowy odpowiadający skokowi kotwicy, w radianach otrzymamy, że strumień przyciągania jest równy

$$\Phi_{rp} = \frac{223 \cdot \sqrt{A_p}}{\sqrt{\gamma_z \cdot \beta + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}}}} \cdot \sqrt{\frac{b}{\alpha_p - \alpha_0}} \quad [\text{Mx}] \quad (175)$$

Analogicznie można napisać, że strumień zwalniania kotwicy jest równy

$$\Phi'_{r0} = \frac{223 \cdot \sqrt{A_0}}{\sqrt{\gamma_z \cdot \beta + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}}}} \cdot \sqrt{\frac{b}{\alpha_p - \alpha_0}} \quad [\text{Mx}] \quad (176)$$

Dzieląc stronami wyrażenia (175) i (176) otrzymamy, że współczynnik wzrostu strumienia k_f podczas przelotu kotwicy będzie równy (por. wzór 57)

$$k_f = \frac{\Phi'_{r0}}{\Phi_{rp}} = \sqrt{\frac{A_0}{A_p}} \quad (177)$$

Następnie biorąc pod uwagę współczynniki bezpieczeństwa $X_{p\Phi}$, $X_{t\Phi}$ oraz współczynnik wzrostu strumienia k_s (por. wzory 44, 46, 158) omawiany współczynnik k_f będzie jeszcze równy

$$k_f = \frac{X_{t\Phi}}{X_{p\Phi}} \cdot k_s \quad (178)$$

4.9. Czas ustalania się strumienia przyciągania

Zgodnie z układem zastępczym podanym na rys. 9, można dla obwodu uzwojenia wzbudzającego napisać następujące równanie różniczkowe

$$L_s \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + \frac{d\Phi_r}{dt} \cdot z \cdot 10^{-8} = U \quad (179)$$

Mnożąc przez liczbę zwojów z i dzieląc przez R_1 obie strony równania otrzymamy

$$\tau_s \cdot \frac{dAZ}{dt} + AZ + \frac{d\Phi_r}{dt} \cdot G_u \cdot 10^{-8} = AZ_u \quad (180)$$

Następnie zgodnie ze wzorem (153) pochodna amperozwojów AZ w stosunku do czasu będzie równa

$$\frac{dAZ}{dt} = AZ_{max} \cdot (r_{\mu min} + r_{\mu s max} \cdot \varphi_r) \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (181)$$

Podstawiając wyrażenia na amperozwoje i ich pochodną do wzoru (180) oraz dzieląc strony przez AZ_{max} otrzymamy

$$\left[\tau_s \cdot (r_{\mu min} + r_{\mu s max} \cdot \varphi_r) + \frac{G_u \cdot 10^{-8}}{0,8 \cdot R_{\mu max}} \right] \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} + (r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_r) \cdot \varphi_r = \frac{AZ_u}{AZ_{max}} \quad (182)$$

Rozwiązując powyższe równanie w stosunku do $\frac{dt}{d\varphi_r}$ przy jednoczesnym wprowadzeniu zależności

$$\tau_{r\min} = \frac{G_u \cdot 10^{-8}}{0,8 \cdot R_{\mu\max}} \quad [\text{s}] \quad (183)$$

gdzie $\tau_{r\min}$ jest minimalną wartością stałej czasowej uzwojenia w odniesieniu do strumienia roboczego (por. wzór 15) otrzymamy, że pochodna czasu w stosunku do względnej wartości strumienia roboczego jest równa

$$\frac{dt}{d\varphi_r} = \frac{\tau_s(r_{\mu\min} + r_{\mu\max} \cdot \varphi_r) + \tau_{r\min}}{\frac{AZ_u}{AZ_{\max}} - r_{\mu\min} \cdot \varphi_r - 0,5 \cdot r_{\mu\max} \cdot \varphi_r^2} \quad (184)$$

Przeprowadzając całkowanie powyższego wyrażenia w stosunku do φ_r , zależność czasu t od chwilowej względnej wartości strumienia roboczego będzie przedstawiała się następująco:

$$t = -\tau_s \cdot \ln \frac{AZ_u - AZ}{AZ_{\max}} + \frac{\tau_{r\min}}{p} \cdot \ln \frac{2 \cdot r_{\mu\min} + r_{\mu\max} \cdot (\varphi_{ru} - \varphi_r)}{r_{\mu\max} \cdot (\varphi_{ru} - \varphi_r)} + C \quad (185)$$

gdzie

$$p = r_{\mu\min} + r_{\mu\max} \cdot \varphi_{ru} \quad (186)$$

który jest współczynnikiem uwzględniającym wpływ strumienia roboczego na oporność jego obwodu.

Dla określenia stałej całkowania C podstawimy $t = 0$; $AZ = 0$, $\varphi_r = 0$, po czym po przeprowadzeniu przekształceń zależność czasu od chwilowej względnej wartości strumienia roboczego i chwilowej wartości amperozwojów będzie się przedstawiała następująco:

$$t = \tau_s \cdot \ln \frac{AZ_u}{AZ_u - AZ} + \frac{\tau_{r\min}}{p} \cdot \ln \frac{\varphi_{ru}}{\varphi_{ru} - \varphi_r} \cdot \left(1 + \frac{r_{\mu\max} \cdot \varphi_r}{2 \cdot r_{\mu\min} + r_{\mu\max} \cdot \varphi_{ru}} \right) \quad (187)$$

Następnie po przyjęciu uproszczenia przez pominięcie wyrażenia

$$\frac{r_{\mu\max} \cdot \varphi_r}{2 \cdot r_{\mu\min} + r_{\mu\max} \cdot \varphi_{ru}} \ll 1 \quad (188)$$

otrzymamy, że zależność czasu t od chwilowej wartości amperozwojów (chwilowej wartości strumienia) będzie się przedstawiać następująco

$$t = \tau_s \cdot \ln \frac{AZ_u}{AZ_u - AZ} + \frac{\tau_{r\min}}{r_{\mu\min} + r_{\mu\max} \cdot \varphi_{ru}} \cdot \ln \frac{\varphi_{ru}}{\varphi_{ru} - \varphi_r} \quad [\text{s}] \quad (189)$$

Z powyższego wzoru widać, że wpływ stałej czasowej w odniesieniu do strumienia rozproszenia τ_s jest uzależniony od stosunku amperozwojów, natomiast

wpływ stałej czasowej w odniesieniu do strumienia roboczego τ_r jest uzależniony od stosunku strumieni roboczych. Ta różnica jest uzasadniona, gdyż oporność magnetyczna obwodu strumienia rozproszenia jest wielkością stałą (strumień jest proporcjonalny do amperozwojów), natomiast oporność obwodu strumienia roboczego wzrasta w miarę wzrostu tego strumienia i nie ma proporcjonalności między wartością amperozwojów a wartością strumienia. Na skutek zmian oporności obwodu strumienia roboczego zmienia się również i stała czasowa. Wpływ tych zmian uwidoczniła wyrażenie $(r_{\mu min} + r_{\mu s max} \cdot \varphi_{ru})$, które powoduje odpowiednie zmniejszenie stałej czasowej.

Na podstawie wzoru (189) można określić czas potrzebny do ustalenia się strumienia przyciągania, a mianowicie:

$$t_{up} = \tau_s \cdot \ln \frac{X_{pi}}{X_{pi} - 1} + \frac{\tau_{r min}}{p} \cdot \ln \frac{X_{p\Phi}}{X_{p\Phi} - 1} \quad [s] \quad (190)$$

$$p = r_{\mu min} + r_{\mu s max} \cdot \varphi_{ru}$$

4.10. Czas ruchu kotwicy

W punkcie 3.5 omówiono dokładnie zjawiska zachodzące w polu magnetycznym i obwodzie uzwojenia wzbudzającego podczas ruchu kotwicy. W tym miejscu ograniczymy się do przyjęcia tego samego założenia, tzn. szybkość narastania strumienia na początku ruchu kotwicy jest taka sama, jaka była szybkość narastania strumienia tuż przed osiągnięciem wartości strumienia przyciągania Φ_{rp} , oraz szybkość narastania strumienia przy końcu ruchu kotwicy jest równa szybkości narastania strumienia tuż po osiągnięciu strumienia zwalniania Φ_{r0} (kotwica w pozycji pracy).

Biorąc pod uwagę wzór (184), szybkość narastania strumienia przy osiągnięciu wartości Φ_{rp} będzie równa

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = \frac{AZ_u - AZ_p}{AZ_{max} \cdot [\tau_s \cdot (r_{\mu min} + r_{\mu s max} \cdot \varphi_{rp}) + \tau_{r min}]} = M \quad (191)$$

a szybkość narastania strumienia magnetycznego przy osiągnięciu wartości Φ'_{r0} będzie równa:

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = \frac{AZ_u - AZ_p}{AZ'_{max} \cdot [\tau_s \cdot (r'_{\mu min} + r'_{\mu s max} \cdot \varphi'_{r0}) + \tau'_{r min}]} = N \quad (192)$$

Zgodnie z rys. 10 szybkość narastania względnego strumienia roboczego podczas ruchu kotwicy będzie równa:

$$\frac{d\varphi_{rk}}{dt} = (M - N) \cdot \frac{t}{t_k} + N \quad (193)$$

gdzie

t_k — czas ruchu kotwicy, w sekundach,

t — chwilowa wartość czasu, w sekundach,

φ_{rk} — względna wartość strumienia podczas ruchu kotwicy.

Po scałkowaniu i podstawieniu $t = 0$ i $\varphi_{rk} = \varphi_{rp}$ otrzymamy

$$\varphi_{rk} = \varphi_{rp} + N \cdot t + (M - N) \cdot \frac{t^2}{2 \cdot t_k} \quad [\text{Mx}] \quad (194)$$

Natomiast po podstawieniu $t = t_k$ względny strumień roboczy $\varphi_{rk} = \varphi'_{r0}$

$$\varphi'_{r0} = \varphi_{rp} + N \cdot t_k + (M - N) \cdot \frac{t_k}{2} \quad [\text{Mx}] \quad (195)$$

Wobec tego czas przelotu kotwicy będzie równy

$$t_k = 2 \cdot \frac{\varphi'_{r0} - \varphi_{rp}}{M + N} \quad [\text{s}] \quad (196)$$

Podstawiając wartości na składniki M i N ze wzorów (191) i (192) oraz przeprowadzając redukcję przy użyciu uprzednio ustalonych zależności, czas przelotu kotwicy będzie równy:

$$t_k = \tau_{pk} \cdot \frac{2 \cdot (k_f - 1) \cdot k_c}{X_{pi} \cdot (k_{smax} + k_c) - \left(k_c + k_f \cdot \frac{k_{smax}}{k_{smin}} \right)} \quad [\text{s}] \quad (197)$$

gdzie τ_{pk} — stała czasowa w czasie przelotu kotwicy równa

$$\tau_{pk} = \frac{\tau_s \cdot (r_{\mu min} + r_{\mu s max} \cdot \varphi_{rp}) + \tau_{r min}}{r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_{rp}} \quad [\text{s}] \quad (198)$$

k_c — stosunek stałych czasowych przy przyciągniętej kotwicy i nie przyciągniętej kotwicy równy

$$k_c = \frac{\tau_s \cdot (r'_{\mu min} + r'_{\mu s max} \cdot \varphi'_{r0}) + \tau'_{r min}}{\tau_s \cdot (r_{\mu min} + r_{\mu s max} \cdot \varphi_{rp}) + \tau_{r min}} \quad (199)$$

4.11. Czas działania układu napędowego

W punkcie 3.6 omówiono szczegółowo czas działania układu napędowego o zwykłej kotwicy. Zgodnie z podanymi tam uwagami czas zadziałania układu napędowego będzie równy sumie czasu t_{up} potrzebnego do ustalenia się strumienia

przyciągania Φ_{rp} i czasu ruchu kotwicy t_k (por. wzory 190 i 197), a mianowicie:

$$t_p = \tau_s \cdot \ln \frac{X_{pi}}{X_{pi} - 1} + \frac{\tau_{rmin}}{p} \cdot \ln \frac{X_{p\Phi}}{X_{p\Phi} - 1} + \tau_{pk} \cdot \frac{2 \cdot (k_f - 1) \cdot k_c}{X_{pi} \cdot (k_{smax} + k_c) - \left(k_c + k_f \cdot \frac{k_{smax}}{k_{smin}} \right)} \quad [s] \quad (200)$$

Przy dużych wartościach współczynnika bezpieczeństwa przyciągania X_{pi} w stosunku do ustalonej wartości amperozwojów można przyjąć następujące uproszczenia

$$\frac{X_{p\Phi}}{X_{p\Phi} - 1} \approx \frac{X_{pi}}{X_{pi} - 1} \quad (201)$$

$$\frac{2 \cdot k_c}{k_c + k_{smax} - \frac{1}{X_{pi}} \cdot \left(k_c + k_f \cdot \frac{k_{smax}}{k_{smin}} \right)} \approx 1 \quad (202)$$

$$\ln \frac{X_{pi}}{X_{pi} - 1} \approx \frac{1}{X_{pi}} \quad (203)$$

$$\frac{r_{\mu min} + r_{\mu s max} \cdot \varphi_{rp}}{r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_{rp}} \approx 1 \quad (204)$$

$$\tau_{pk} \approx \tau_s + \frac{\tau_{rmin}}{p} \quad (205)$$

Po wprowadzeniu wyżej wymienionych uproszczeń czas zadziałania układu napędowego będzie równy:

$$t_p = \frac{\tau_s + \frac{\tau_{rmin}}{p}}{X_{pi}} \cdot \sqrt{\frac{A_0}{A_p}} \quad [s] \quad (206)$$

Ostatecznie otrzymano, że czas zadziałania układu napędowego o nasycanej kotwicy oblicza się w sposób analogiczny jak w przypadku układu napędowego o zwykłej kotwicy (por. wzór 80).

4.12. Współczynnik oporności obwodu magnetycznego z nasyconą kotwicą

Biorąc pod uwagę wzór (162) określający oporność obwodu magnetycznego przy strumieniu szczytkowym Φ'_k , można określić minimalną wartość tej oporności ($\varphi'_k = 0$), a mianowicie:

$$R'_{\mu k \min} = \frac{\alpha_0}{2 \cdot b} \cdot \left[\gamma_z \cdot \beta + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}} \right] \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (207)$$

Następnie uwzględniając wyrażenia (47), (54) i (129), określające strumień szczątkowy Φ'_k i współczynnik bezpieczeństwa zwalniania $X_{0\Phi}$ oraz minimalną oporność obwodu strumienia roboczego można w przybliżeniu napisać, że:

$$R'_{\mu k \min} = \frac{H_k \cdot l_s}{\Phi'_{r0}} \cdot X_{0\Phi} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (208)$$

Wobec tego uwzględniając wzory (207) i (208) oraz wprowadzając indukcję zwalniania kotwicy B_{r0} , odpowiadającą strumieniowi Φ'_{r0} ,

$$\Phi'_{r0} = B_{r0} \cdot s_r \quad [\text{Mx}] \quad (209)$$

$$H_{r0} = \frac{B_{r0}}{\mu} \quad [\text{Oe}] \quad (210)$$

otrzymujemy, że minimalna oporność obwodu magnetycznego przy przyciągniętej kotwicy jest równa:

$$R'_{\mu \min} = \frac{l_s}{\Phi'_{r0}} \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi}) \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (211)$$

Po wprowadzeniu do powyższego wyrażenia wzoru (176) określającego strumień zwalniania Φ'_{r0} otrzymamy:

$$R'_{\mu \min} = \frac{l_s}{223 \cdot \sqrt{A_0}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_p - \alpha_0}{b}} \cdot \sqrt{k_0} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (212)$$

przy czym dla ułatwienia wprowadzono współczynnik oporności szczelin powietrznych równy:

$$k_0 = \gamma_z \cdot \beta + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}} \quad (213)$$

Następnie biorąc pod uwagę wzory (128) i (129), określające minimalne oporności obwodu magnetycznego w obu krańcowych położeniach kotwicy, oraz wzór (132), określający minimalną wartość współczynnika wzrostu strumienia przy przejściu kotwicy z jednego krańcowego położenia w drugie, można napisać przy uwzględnieniu wzoru (213)

$$\frac{\alpha_p - \alpha_0}{2 \cdot b} = \frac{R_{\mu \min} \cdot (k_{s \min} - 1)}{k_0} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (214)$$

Wprowadzając wyrażenie (214) do wzoru (211) i rozwiązując równanie w stosunku do $R_{\mu \min}$, otrzymamy ostatecznie:

$$R'_{\mu min} = 0,4 \frac{l_s^2 \cdot 10^{-4}}{A_0} \cdot \frac{(k_{smin} - 1)}{k_0} \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})^2 \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (215)$$

Część powyższego wzoru zależną od własności materiału zastosowanego na obwód magnetyczny, od założonych współczynników i od przyszłej konstrukcji nazwiemy współczynnikiem oporności magnetycznej k_{rmin} , który jest równy:

$$k_{rmin} = 0,4 \cdot \frac{k_{smin} - 1}{k_0} \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})^2 \cdot 10^{-4} \quad [\text{Gcm}^{-2}] \quad (216)$$

Wobec tego minimalna wartość oporności magnetycznej obwodu strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy będzie równa

$$R'_{\mu min} = \frac{k_{rmin}}{A_0} \cdot I_s^2 \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (217)$$

Otrzymaliśmy taki sam wzór, jak w przypadku kotwicy zwykłej (nie nasycanej), z tym że wyrażenie określające współczynnik oporności obwodu magnetycznego k_r ma nieco inną postać (por. wzory 84 i 216). Przykładowo można podać, że dla $k_{smin} = 2$, $H_{r0} = 5 \text{ Oe}$, $H_k = 0,9 \text{ Oe}$, $X_{0\Phi} = 2$, $\gamma_z = 1$, $\beta = 0,145$ i $\frac{a}{d} = 0,6$ współczynnik oporności magnetycznej obwodu strumienia $k_{rmin} = 0,00088 \text{ Gcm}^{-2}$.

Mając określoną minimalną wartość oporności obwodu strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy, można określić minimalną wartość oporności przy nie przyciągniętej kotwicy (por. wzór 132)

$$R_{\mu min} = \frac{k_{smin} \cdot k_{rmin}}{A_0} \cdot I_s^2 \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (218)$$

5. OBLICZANIE UKŁADU NAPĘDOWEGO O ZWYKŁEJ (NIE NASYCONEJ) KOTWICY

5.1. Podstawowe wzory

Podstawiając do wyrażenia (49) wzór (53) określający stosunek δ_s/s_s oraz wzór (85) określający $R_{\mu 0}$ otrzymamy, że przekrój rdzenia będzie równy

$$s_r = \frac{158}{B_{r0}} \cdot \frac{A_0}{\sqrt{k_r(k_s - 1)}} \cdot \frac{1}{l_s} \quad [\text{cm}^2] \quad (219)$$

Przy braku obwodów zwartych ogólnych stała czasowa uzwojenia przy nie przyciągniętej kotwicy zgodnie ze wzorami (59), (60), (61) jest równa:

$$\tau_p = 0,4 \cdot \pi \cdot G_u \cdot 10^{-8} \left(\frac{1}{R_{\mu n}} + \frac{1}{R_{\mu p}} \right) \quad [\text{s}] \quad (220)$$

Podstawiając do wyrażenia (80) dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania X_{pid} , omówiony w punkcie 2.5.3, da się określić minimalny czas przyciągania układu napędowego, jaki w danych warunkach można uzyskać, a mianowicie:

$$t_{pmin} = \frac{\tau_p}{X_{pid}} \cdot \sqrt{\frac{A_0}{A_p}} \quad [s] \quad (221)$$

W wyrażeniu (22) określającym współczynnik bezpieczeństwa X_{pid} wchodzi amperozwoje przyciągania AZ_p , które są równe

$$AZ_p = 0,8 \cdot \Phi_{rp} \cdot R_{\mu p} \quad (222)$$

Podstawiając do powyższego wzoru wyrażenia (48), (86) i (87) otrzymamy, że amperozwoje przyciągania są równe

$$AZ_p = 125 \cdot \sqrt{\frac{A_p}{A_0} \cdot \frac{k_s \cdot \sqrt{k_r}}{\sqrt{k_s - 1}}} \cdot l_s \quad (223)$$

Podstawiając do wzoru (221) wyrażenia na τ_p (wzór 220), na $R_{\mu n}$ (wzór 27), na $R_{\mu p}$ (wzór 86), na G_u (wzór 10 i 12), na X_{pid} (wzór 22), na AZ_p (wzór 223) oraz na s_r (wzór 219) otrzymamy, że minimalny czas przyciągania układu napędowego będzie równy

$$t_{pmin} = \frac{1,33}{10^5} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot k_w \cdot h_u \cdot D_r}{p_{ch} \cdot (D_r + h_u) \cdot (D_r + 2 \cdot h_u)}} \cdot \sqrt[8]{\frac{B_{r0}^2 \cdot k_r^5 \cdot k_s^8}{A_0^2 \cdot (k_s - 1)^3}} \cdot \left[\frac{D_r + h_u}{k_n \cdot h_u} \cdot l_r \cdot \sqrt[4]{l_s^3} + \frac{A_0}{k_s \cdot k_r} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{l_s^3}} \right] \quad [s] \quad (224)$$

$$l_r = 0,42 \cdot l_s \quad [cm] \quad (225)$$

W celu znalezienia najkorzystniejszej długości linii sił w obwodzie magnetycznym, tj. l_s , należy znaleźć pochodną wyrażenia w nawiasach przy założeniu, że długość rdzenia $l_r = 0,42 l_s$. Wyrażenie w nawiasach będzie wtedy równe:

$$0,42 \cdot \frac{D_r + h_u}{k_n \cdot h_u} \cdot \sqrt[4]{l_s^3} + \frac{A_0}{k_s \cdot k_r} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{l_s^3}} \quad (226)$$

Biorąc pochodną powyższego wyrażenia i przyrównując ją do zera otrzymamy, że najkorzystniejsza długość linii sił w obwodzie magnetycznym przy stałych współczynnikach k_s i k_r oraz stałym stosunku h_u/D_r będzie równa:

$$l_3 = 0,9 \cdot \sqrt[3]{\frac{A_0 \cdot k_n}{k_s \cdot k_r} \cdot \frac{h_u}{D_r + h_u}} \quad [cm] \quad (227)$$

Podstawiając jeszcze wyrażenie na k_r (wzór 84) ostatecznie otrzymamy

$$l_s = 27 \cdot \sqrt[3]{\frac{k_n \cdot A_0}{k_s \cdot (k_s - 1) \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})^2} \cdot \frac{h_u}{D_r + h_u}} \quad [\text{cm}] \quad (228)$$

Ze wzoru (228) widać, że najkorzystniejsza długość linii sił w obwodzie strumienia roboczego, a tym samym wymiary obwodu magnetycznego, są zależne od właściwości materiału, tj. od przenikalności H_{r0} i siły powściągającej H_k , od przyjętego współczynnika wzrostu strumienia przy przejściu kotwicy z jednej krańcowej pozycji w drugą k_s oraz od stosunku wysokości uzwojenia do średnicy rdzenia h_u/D_r .

Po podstawieniu do wzoru (219) wyrażenia (228), określającego l_s , i wyrażenia (84), określającego k_r , otrzymamy, że przekrój rdzenia jest równy

$$s_r = \frac{920}{B_{r0}} \cdot \sqrt[3]{\frac{k_s \cdot A_0^2}{k_n \cdot (k_s - 1)^2 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})} \cdot \frac{D_r + h_u}{h_u}} \quad [\text{cm}^2] \quad (229)$$

Wobec tego objętość materiału zużytego na wykonanie obwodu magnetycznego będzie równa przekrojowi s_r pomnożonemu przez długość l_s , a mianowicie:

$$V_s = 2,5 \cdot \frac{A_0 \cdot 10^4}{B_{r0} \cdot (k_s - 1) \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})} \quad [\text{cm}^3] \quad (230)$$

Otrzymaliśmy prosty wzór określający objętość materiału w obwodzie magnetycznym, która jest proporcjonalna do potrzebnej pracy końcowej kotwicy A_0 i odwrotnie proporcjonalna do przyjętej wartości indukcji zwalniania B_{r0} i współczynnika wzrostu strumienia przy przejściu kotwicy z jednego położenia krańcowego w drugie.

Następnie podstawiając do wyrażenia (223), określającego amperozwoje przyciągania AZ_p , uprzednio określoną najkorzystniejszą długość l_s (wzór 222) i współczynnik k_r (wzór 84) otrzymamy, że amperozwoje przyciągania przy najkorzystniejszej pod względem czasu przyciągania długości l_s są równe

$$AZ_p = 22 \cdot \sqrt[3]{\frac{A_p}{A_0}} \cdot \sqrt[3]{\frac{k_n \cdot A_0 \cdot k_s^2 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi}) \cdot h_u}{(k_s - 1) \cdot (D_r + h_u)}} \quad (231)$$

Należy zwrócić uwagę, że w przypadku zastosowania lepszego materiału na obwód magnetyczny (H_{r0} i H_k posiadają małe wartości) otrzymuje się większe wymiary tego obwodu (por. wzory 228, 229, 230). Ale za to amperozwoje przyciągania dla tego lepszego materiału są mniejsze i moc potrzebna przy określonym współczynniku bezpieczeństwa będzie również mniejsza.

Z poprzednich rozważań wynikało, że oporność szczeliny powietrznej odpowiadająca skokowi kotwicy jest ściśle określona i równa δ_s/s_s . Wobec tego powierzchnia nabiegunknika s_s powinna być dostosowana do skoku kotwicy δ_s . W przypadku kiedy rdzeń nie ma nabiegunknika, skok kotwicy będzie najmniejszy i równy

$$\delta_{smin} = s_r \frac{\delta_s}{s_s} \quad [\text{cm}] \quad (232)$$

Podstawiając do powyższego wzoru wyrażenie (86) określające stosunek δ_s/s_s , wyrażenie (207) określające przekrój rdzenia s_r , wyrażenie (84) określające współczynnik k_r i wyrażenie (228) określające l_s , otrzymamy, że minimalny skok kotwicy jest równy

$$\delta_{smin} = \frac{27}{B_{r0}} \sqrt[3]{k_n \cdot A_0 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_\Phi) \cdot \frac{(k_s - 1)^2 \cdot h_u}{k_s \cdot (D_r + h_u)}} \quad [\text{cm}] \quad (233)$$

Mając określoną najkorzystniejszą długość linii sił w obwodzie strumienia roboczego, można obliczyć minimalny czas przyciągania t_{pmin} , podstawiając do wzoru (224) wyrażenie na l_s (wzory 228 i 227), na l_r (wzór 225), na s_r (wzór 228) oraz na k_r (wzór 84), przy czym

$$D_r = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{s_r} \quad [\text{cm}] \quad (234)$$

Wobec tego minimalny czas przyciągania będzie równy

$$t_{pmin} = \frac{0,66}{10^4} \sqrt[4]{\frac{\gamma \cdot k_w \cdot D_r}{p_{ch} \cdot (D_r + 2 \cdot h_u)} \cdot \frac{k_s \cdot B_{r0} \cdot A_0^2}{k_n \cdot (k_s - 1)^2 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})} \cdot \frac{h_u}{D_r + h_u}} \quad [\text{s}] \quad (235)$$

Następnie można określić moc przyciągania P_p , która będzie równa

$$P_p = (AZ_p)^2 \cdot \frac{1}{G_u} \quad [\text{W}] \quad (236)$$

Po podstawieniu do wzoru (236) sprowadzonej oporności G_u (wzór 10) uprzednio określonych amperozwojów AZ_p (por. wzór 223) i po przeprowadzeniu redukcji i założeniu

$$l_u \approx 0,38 \cdot l_s \quad [\text{cm}] \quad (237)$$

otrzymamy, że moc przyciągania jest równa:

$$P_p = \frac{15 \cdot A_p \cdot 10^{-3}}{\gamma \cdot k_w \cdot A_0} \sqrt[3]{\frac{k_n \cdot A_0 \cdot k_s^5 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_0) \cdot (D_r + h_u)^2}{(k_s - 1) \cdot h_u^2}} \quad [\text{W}] \quad (238)$$

Z powyższego wzoru widać, jaki poważny wpływ na moc przyciągania mają właściwości materiału obwodu magnetycznego, tj. H_{r0} — natężenie pola potrzebne do wywołania założonej indukcji zwalniania B_{r0} oraz siła powściągająca H_k . Poza tym jeszcze duży wpływ ma współczynnik wzrostu strumienia roboczego k_s przy przejściu kotwicy z jednego krańcowego położenia do drugiego.

Zakładając, że długość uzwojenia l_u jest w przybliżeniu równa $0,38 l_s$

(długość obwodu magnetycznego) oraz wprowadzając wzór (229) określający przekrój rdzenia s_r otrzymamy, że moc maksymalna (por. wzór 21), jaka może być tracona w uzwojeniu, jest równa

$$P_m = \frac{1120 \cdot p_{ch} \cdot (D_r + 2 \cdot h_u)}{\sqrt{B_{r0}} \cdot D_r} \cdot \sqrt[6]{\frac{k_n \cdot A_0^4 \cdot h_u}{k_s \cdot (k_s - 1)^4 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})^5 \cdot (D_r + h_u)}} \quad [\text{W}] \quad (239)$$

Następnie dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania X_{pid} po podstawieniu do wzoru (22) wyrażenia na l_u (wzór 237) na AZ_p (wzór 223) i na s_r (wzór 229) będzie równy

$$X_{pid} = \frac{275}{\sqrt[4]{B_{r0}}} \cdot \sqrt{\frac{A_0}{A_p}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot k_w \cdot p_{ch} (D_r + 2 \cdot h_u)}{D_r}} \cdot \sqrt[12]{\frac{A_0^2}{k_n \cdot k_s^{11} \cdot (k_s - 1)^2 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})^{13}} \cdot \frac{h_u^5}{(D_r + h_u)^5}} \quad (240)$$

Z powyższego wyrażenia widać, że dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania ma większą wartość dla lepszego materiału (H_{r0} , H_k mają małe wartości). Biorąc pod uwagę wzór (56), wysokość sztyftu antymagnetycznego jest równa

$$\delta_a = \delta_s \cdot \left(\frac{H_k \cdot X_{0\Phi} \cdot s_s}{\Phi'_{r0} \cdot \delta_s} \cdot i_s - R_{\mu l} \cdot \frac{s_s}{\delta_s} \right) \quad [\text{cm}] \quad (241)$$

Podstawiając do powyższego wzoru wyrażenia na $\Phi'_{r0} = B_{r0} \cdot s_r$, na s_r (wzór 219), na k_r (wzór 84) oraz na δ_s/s_s (wzór 87) otrzymamy, że sztyft antymagnetyczny jest równy

$$\delta_a = \delta_s \cdot \left[\frac{H_k \cdot X_{0\Phi}}{(k_s - 1) \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})} - R_{\mu l} \cdot \frac{s_s}{\delta_s} \right] \quad [\text{cm}] \quad (242)$$

5.2. Przebieg obliczenia

5.2.1. Indukcja w rdzeniu

W celu określenia indukcji magnetycznej w rdzeniu należy przeprowadzić linearyzację krzywej magnesowania $B = f(H)$ w sposób podany na rys. 5, tj. za pomocą dwóch prostych \overline{OA} i \overline{AB} , przy czym wykres użyty do tego celu powinien zawierać pomiary przy natężeniu pola magnetycznego do 100 Oe. Punkt przecięcia omawianych prostych określi największą wartość indukcji magnetycznej B_n , jaką można przyjąć przy przeprowadzaniu obliczeń.

Zgodnie z rozważaniami przeprowadzonymi w punkcie 2.6, przez rdzeń oprócz strumienia roboczego przechodzi jeszcze strumień rozproszenia, którego wartość można ocenić na około 70% strumienia roboczego. W związku z tym przy określaniu indukcji B_{ru} odpowiadającej strumieniowi magnetycznemu w stanie ustalonym i przyciągniętej kotwicy, tzn. strumieniowi Φ'_{ru} , należy indukcję nasycenia B_n określoną

z wykresu $B = f(H)$ w wyżej podany sposób pomnożyć przez współczynnik liczbowy 0,6. Wobec tego indukcja zwalniania B_{r0} , odpowiadająca strumieniowi zwalniania Φ'_{r0} , będzie równa

$$B_{r0} = 0,6 \cdot \frac{B_n}{X_{t\phi}} \quad [\text{Gs}] \quad (243)$$

W przeciętnych układach napędowych współczynnik $X_{t\phi}$ powinien zawierać się w granicach $1,4 \div 1,7$. Przy założeniu większej wartości współczynnika $X_{t\phi}$ zmniejszają się:

- indukcja zwalniania B_{r0} ,
- natężenie pola magnetycznego H_{r0} , potrzebne do wywołania indukcji B_{r0} .

Wobec tego zwiększenie wartości współczynnika $X_{t\phi}$ powoduje zwiększenie wymiarów układu napędowego (objętość materiału potrzebnego do wykonania obwodu magnetycznego — por. wzór 230), niewielkie zmniejszenie amperozwojów przyciągania (wzór 231), niewielkie zwiększenie minimalnego czasu przyciągania układu napędowego (wzór 235), zmniejszenie mocy przyciągania P_p (por. wzór 238) i zwiększenie dopuszczalnego współczynnika bezpieczeństwa przyciągania X_{pid} (por. wzór 240).

Należy zwrócić uwagę, że ze względu na istnienie w rdzeniu i jarzmie strumienia rozproszenia rzeczywista w nich indukcja będzie miała większą wartość oraz spadek siły magnetomotorycznej będzie odpowiednio większy. Wobec tego przy określeniu natężenia pola magnetycznego, potrzebnego do wywołania w rdzeniu indukcji B_{r0} , należy na wykresie $B = f(H)$ odczytać natężenia pola magnetycznego H_{r0} , potrzebne do wywołania indukcji równej $1,4 B_{r0}$. Współczynnik 1,4 uwzględnia, że strumień rozproszenia w pobliżu kotwicy ma znacznie mniejszą wartość niż w drugim końcu rdzenia.

Tablica 1

Zależność zasadniczych parametrów układu napędowego od wartości siły powściągającej H_k , przy czym $H_{r0} = 6$, $X_{0\phi} = 2$

Określenie parametru	Siła powściągająca H					
	0,75	1	1,5	2	3	5
Najmniejszy czas przyciągania $t_{p \min}$ (wzór 235)	1,02	1	0,98	0,95	0,91	0,84
Objętość materiału obwodu magnetycznego (wzór 230)	1,06	1	0,89	0,8	0,67	0,5
Maksymalna moc, jaka może być stracona w uzwojeniu (wzór 239)	1,05	1	0,92	0,84	0,72	0,57
Moc przyciągania (wzór 238)	0,92	1	1,17	1,35	1,72	2,54
Dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania (wzór 240)	1,07	1	0,88	0,76	0,65	0,48
Najmniejszy skok kotwicy (wzór 233)	0,98	1	1,03	1,08	1,15	1,26

W tablicy 1 podano zależność zasadniczych parametrów układu napędowego od wartości siły powściągającej H_k . Z danych z tabl. 1 widać wyraźnie, że zastosowanie gorszego materiału (H_k duże) na obwód magnetyczny pozornie polepsza właściwości układu napędowego, a więc zmniejsza wymiary i minimalny czas przyciągania kotwicy. Jednak w tym przypadku znacznie zwiększa się moc przyciągania i zmniejsza się dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania. Zwiększenie mocy przyciągania przy normalnym współczynniku bezpieczeństwa przyciągania $X_{p1} = 2$ powoduje znaczne zwiększenie mocy pobieranej przez układ napędowy w stanie ustalonym, a tym samym zwiększenie mocy źródła zasilania urządzeń.

5.2.2. Wymiary obwodu magnetycznego

Punktem wyjściowym do obliczenia wymiarów w obwodzie magnetycznym jest przyjęcie wartości:

- współczynnika wzrostu strumienia roboczego k_s , przy stałych amperozwojach przy przejściu kotwicy z jednej krańcowej pozycji do drugiej (por. wzór 39),
- współczynnika bezpieczeństwa zwalniania w odniesieniu do wartości strumienia roboczego $X_{0\phi}$ (por. wzór 47).

W celu ułatwienia wyboru wartości omawianych współczynników uwidoczniło w tablicach 2 i 3 ich wpływ na dane charakterystyczne układu napędowego. Z podanych w tabl. 2 i 3 wynika, że zasadniczo korzystniejsze są właściwości układu napędowego przy większych wartościach tych współczynników, gdyż wtedy ulega zmniejszeniu objętość materiału w obwodzie magnetycznym V_s i najmniejszy czas przyciągania $t_{p\min}$, a zwiększa się moc przyciągania P_p i najmniejszy skok kotwicy

Tablica 2

Zależność parametrów układu napędowego od współczynnika wzrostu strumienia roboczego k_s przy stałych amperozwojach wzbudzających
($h_u/D_r = \text{const}$; $X_{0\phi} = \text{const}$)

Określenie parametru	Współczynnik k_s						
	1,5	2	2,5	3	4	5	6
Najmniejszy czas przyciągania $t_{p\min}$ (wzór 235)	1,32	1	0,89	0,78	0,69	0,63	0,59
Objętość materiału obwodu magnetycznego (wzór 230)	2,0	1	0,67	0,5	0,33	0,25	0,20
Maksymalna moc, jaka może być tracona w uzwojeniu (wzór 239)	1,66	1	0,74	0,59	0,43	0,346	0,285
Moc przyciągania (wzór 238)	0,78	1	1,27	1,55	2,20	2,9	3,65
Dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania (wzór 240)	1,46	1	0,77	0,62	0,43	0,34	0,28
Najmniejszy skok kotwicy (wzór 233)	0,69	1	1,21	1,38	1,65	1,86	2,03

Tabela 3

Zależność parametrów układu napędowego od współczynnika bezpieczeństwa zwalniania $X_{0\phi}$

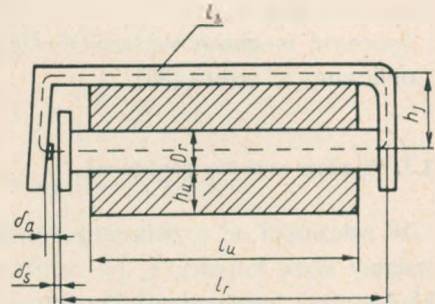
$$H_{r0} = 6; H_k = 1; k_s = \text{const.}$$

Określenie parametru	Współczynnik bezpieczeństwa zwalniania $X_{0\phi}$					
	1,5	2	3	4	6	10
Najmniejszy czas przyciągania $t_{p \min}$ (wzór 235)	1,02	1	0,98	0,95	0,91	0,84
Objętość materiału obwodu magnetycznego (wzór 230)	1,06	1	0,89	0,8	0,67	0,5
Maksymalna moc, jaka może być tracona w uzwojeniu (wzór 239)	1,05	1	0,92	0,84	0,72	0,57
Moc przyciągania (wzór 238)	0,92	1	1,17	1,35	1,72	2,52
Dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania (wzór 240)	1,07	1	0,88	0,76	0,65	0,48
Najmniejszy skok kotwicy (wzór 233)	0,98	1	1,03	1,08	1,15	1,26

$\delta_{s \min}$. Wobec tego większe wartości obu współczynników k_s i $X_{0\phi}$ powinny być przyjmowane dla układów o szybkim działaniu i dużym obciążeniu. Natomiast dla układów napędowych, od których nie wymaga się zbyt krótkiego czasu działania, należy przyjmować mniejsze wartości obu współczynników w celu zmniejszenia pobieranej mocy przy normalnym współczynniku bezpieczeństwa przyciągania $X_{pi} = 2$. Dla zwykłych neutralnych przekaźników telefonicznych współczynnik k_s waha się w granicach 3÷5. Natomiast współczynnik $X_{0\phi}$ zawarty jest w granicach 2÷4.

Rys. 14. Wymiary w układzie napędowym o zwykłej kotwicy

l_s — długość linii sił w obwodzie strumienia roboczego, l_r — długość rdzenia, l_u — długość uzwojenia, h_u — wysokość uzwojenia, D_r — średnica rdzenia, δ_a — wysokość sztyftu antymagnetycznego, δ_s — skok kotwicy



Określenie wartości współczynnika oporności obwodu strumienia rozproszenia k_n zależy od przyjętej konstrukcji i waha się w granicach 3÷4. Następnie stosunek wysokości uzwojenia do średnicy rdzenia h_u/D_r powinien zawierać się w granicach 0,8÷1,0, przy czym dla układów napędowych przystosowanych do szybkiej pracy korzystniejsze są większe wartości tego stosunku.

Po ustaleniu wyżej wymienionych współczynników można przystąpić do obliczenia wymiarów obwodu magnetycznego (por. rys. 14)

- a) przekrój rdzenia s_r obliczamy według wzoru (229),
 b) długość linii sił w obwodzie magnetycznym l_s obliczamy według wzoru (228),
 c) średnicę rdzenia według wzoru poniżej

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \cdot s_r}{\pi}} \quad [\text{cm}] \quad (244)$$

- d) wysokość uzwojenia według wzoru

$$h_u = D_r \cdot \left(\frac{h_u}{D_r} \right) \quad [\text{cm}] \quad (245)$$

gdzie: h_u/D_r — uprzednio założony stosunek

- e) wysokość jarzma określa się ze wzoru

$$h_j = 0,6 \cdot D_r + h_u \quad [\text{cm}] \quad (246)$$

- f) długość rdzenia określamy ze wzoru

$$l_r = 0,5 \cdot l_s - h_j \quad [\text{cm}] \quad (247)$$

- g) długość uzwojenia określamy ze wzoru

$$l_u = l_r - 0,5 \cdot h_u \quad [\text{cm}] \quad (248)$$

- h) współczynnik oporności obwodu magnetycznego obliczamy według wzoru (84),
 i) oporność obwodu strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy obliczamy ze wzoru (85),
 k) oporność obwodu strumienia roboczego przy nie przyciągniętej kotwicy obliczamy ze wzoru (86),
 l) oporność magnetyczną szczeliny powietrznej odpowiadającej skokowi kotwicy obliczamy ze wzoru (87).

5.2.3. Wymiary szczeliny powietrznej

W zależności od rozwiązania konstrukcyjnego obliczanego układu napędowego ustalamy skok kotwicy δ_s po założeniu odpowiedniej przekładni uruchamiającej układ sprężyn (mechanizm). Przyjęty w ten sposób skok musi być większy lub równy minimalnemu skokowi kotwicy obliczonemu według wzoru (248).

Obecnie można obliczyć wymiary szczeliny powietrznej:

- a) powierzchnię nabiegownika obliczamy według wzoru:

$$s_s = s_r \cdot \frac{\delta_s}{\delta_{s, \min}} \quad [\text{cm}^2] \quad (249)$$

- b) wysokość sztyftu antymagnetycznego oblicza się ze wzoru (242).

5.2.4. Stała czasowa i moc tracona w uzwojeniu

- a) sprowadzoną przewodność uzwojenia oblicza się według wzoru (10),
 b) stałą czasową obwodu uzwojenia w odniesieniu do strumienia rozproszenia (por. wzory 27, 29) oblicza się według wzoru:

$$\tau_s = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot (D_r + h_u)}{10^8 \cdot k_a \cdot h_u} \cdot I_r \cdot G_u \quad [\text{s}] \quad (250)$$

- c) stałe czasowe obwodu uzwojenia w odniesieniu do strumienia roboczego określa się:
 przy nie przyciągniętej kotwicy (por. wzór 59)

$$\tau_{rp} = \frac{0,4 \cdot \pi}{10^8 \cdot R_{\mu 0}} \cdot G_u \quad [\text{s}] \quad (251)$$

przy przyciągniętej kotwicy

$$\tau_{r0} = \frac{0,4 \cdot \pi}{10^8 \cdot R_{\mu p}} \cdot G_u \quad (252)$$

- d) amperozwoje przyciągania oblicza się według wzoru (231),
 e) moc przyciągania oblicza się według wzoru:

$$P_p = (AZ_p)^2 \cdot \frac{1}{G_u} \quad [\text{W}] \quad (253)$$

- f) współczynnik bezpieczeństwa przyciągania określa się dla żądanego czasu przyciągania t_p na podstawie wykresu $t_p = f(X_{pi})$ wykonanego według wzoru:

$$t_p = (\tau_s + \tau_{rp}) \cdot \left[\ln \frac{X_{pi}}{X_{pi} - 1} + \frac{2 \cdot (k_f - 1) \cdot k_c}{X_{pi} \cdot (k_c + k_s) - (k_c + k_f)} \right] \quad [\text{s}] \quad (254)$$

gdzie

$$k_f = \sqrt{\frac{A_0}{A_p}}; \quad k_c = \frac{\tau_s + \tau_{r0}}{\tau_s + \tau_{rp}}$$

- g) moc ustaloną traconą w uzwojeniu oblicza się według wzoru

$$P_\mu = X_{pi}^2 \cdot P_p \quad [\text{W}] \quad (255)$$

6. OBLICZANIE UKŁADU NAPĘDOWEGO Z NASYCONĄ KOTWICĄ

6.1. Uwagi wstępne

W celu uproszczenia przeprowadzanych rozważań wprowadzono dwa teoretyczne krańcowe stany, a mianowicie (por. punkt 4.5):

- a) stan całkowitego nasycenia kotwicy; w tym stanie strumień roboczy Φ_r i oporność

magnetyczna obwodu tego strumienia R_μ osiągają swoje maksymalne wartości (por. wzory 121, 122, 123 i 124),

b) stan nienasylenia kotwicy, tzn. strumień roboczy posiada wartość bliską zera, a oporność magnetyczna obwodu R_μ osiąga swoją minimalną wartość (por. wzory 128 i 129).

W rzeczywistym przypadku mamy do czynienia ze stanem pośrednim, w którym parametry obwodu magnetycznego są uzależnione od wartości strumienia roboczego. We wzorach na amperozwoje potrzebne do wywołania odpowiedniego strumienia (por. wzór 153), oporność magnetyczną obwodu strumienia roboczego (por. wzór 154) itd. wchodzi między innymi następujące czynniki:

$$\begin{aligned} r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot q_r &\approx 1,1 \cdot r_{\mu min} \\ r'_{\mu min} + 0,5 \cdot r'_{\mu s max} \cdot q'_r &\approx 1,05 \cdot r'_{\mu min} \\ r_{\mu min} + r_{\mu s max} \cdot q_r &\approx 1,2 \cdot r_{\mu min} \\ k_s &\approx 1,05 \cdot k_{s min} \end{aligned} \quad (256)$$

Ponieważ przed obliczeniem wartości strumienia roboczego nie można określić wartości oporności, wprowadzono podane w wyrażeniach (256) uproszczenia, które po ukończeniu obliczenia układu napędowego mogą być sprawdzone. Przy zbyt dużych różnicach należy skorygować zaproponowane uproszczenia i wykonać powtórne obliczenia.

6.2. Podstawowe wzory

Przekrój rdzenia s_r w obwodzie magnetycznym zależy od założonej indukcji zwalniania B_{r0} , strumienia zwalniania Φ'_{r0} (por. wzór 176) i będzie równy:

$$s_r = \frac{223}{B_{r0}} \cdot \frac{\sqrt{A_0}}{k_0} \cdot \sqrt{\frac{b}{\alpha_p - \alpha_0}} \quad [\text{cm}^2] \quad (257)$$

Po podstawieniu do powyższego wyrażenia wzoru (214), określającego różnicę kątów nachylenia kotwicy otrzymamy, że przekrój rdzenia jest równy:

$$s_r = \frac{158}{B_{r0}} \cdot \frac{A_0}{\sqrt{k_{r min} \cdot (k_{s min} - 1)}} \cdot \frac{1}{l_s} \quad [\text{cm}^2] \quad (258)$$

$$D_{re} = \sqrt{\frac{4 \cdot s_r}{\pi}} \quad [\text{cm}] \quad (259)$$

Wobec tego średnica rdzenia będzie równa:

$$D_{re} = \frac{14}{\sqrt{B_{r0}}} \cdot \frac{\sqrt{A_0}}{\sqrt{k_{r min} \cdot (k_{s min} - 1)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{l_s}} \quad [\text{cm}] \quad (260)$$

Przy braku obwodów zwartych ogólna ekwiwalentna stała czasowa obwodu uzwojenia przy nie przyciągniętej kotwicy zgodnie ze wzorami (80) i (206) jest równa:

$$\tau_{pe} = \tau_s + \frac{\tau_{rmin}}{p} \quad [s] \quad (261)$$

Wprowadzając do wzoru (261) wyrażenia na τ_s , τ_{rmin} , p , $r_{\mu min}$ (wzór 137 oraz uproszczenia według wyrażień 256) otrzymamy:

$$\tau_{pe} = \frac{0,4 \cdot \pi}{10^8} \cdot G_u \cdot \left(\frac{1}{R_{\mu n}} + \frac{1}{1,2 \cdot R_{\mu min}} \right) \quad [s] \quad (262)$$

Podstawiając do wyrażenia (206) dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania, można określić minimalny czas przyciągania układu napędowego, jaki może być osiągnięty w danym przypadku:

$$t_{pmin} = \frac{\tau_{pe}}{X_{pid}} \cdot \sqrt{\frac{A_0}{A_p}} \quad [s] \quad (263)$$

W wyrażeniu (22), określającym współczynnik bezpieczeństwa X_{pid} , wchodzi amperozwoje przyciągania AZ_p , które zostały określone wzorem (153). Wprowadzając do tego wzoru uproszczenia określone wyrażeniami (256) oraz wyrażenia (133), (136), (137), (173) i (218) otrzymamy, że amperozwoje przyciągania są równe:

$$AZ_p = 140 \cdot \sqrt{\frac{A_p}{A_0} \cdot \frac{k_{smin} \cdot k_{rmin}}{k_{smin} - 1}} \cdot I_s \quad (264)$$

Podstawiając do wzoru (263) wyrażenia na $R_{\mu n}$ (wzór 27), na $R_{\mu min}$ (wzór 218), na G_u (wzór 10) oraz na X_{pid} (wzór 22), na D_r (wzór 260) i na AZ_p (wzór 264) otrzymamy, że minimalny czas przyciągania układu napędowego jest równy:

$$t_{pmin} = \frac{1,5}{10^5} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot k_w \cdot D_{re} \cdot h_u}{p_{ch} \cdot (D_{re} + 2 \cdot h_u) \cdot (D_{re} + h_u)}} \cdot \sqrt[8]{\frac{B_{r0}^2 \cdot k_{rmin}^5 \cdot k_{smin}^8}{A_0^2 \cdot (k_{smin} - 1)^3}} \cdot \left[\frac{D_{re} + h_u}{k_n \cdot h_u} \cdot \sqrt[4]{I_s^9} + \frac{A_0}{1,2 \cdot k_{smin} \cdot k_{rmin}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{I_s^3}} \right] \quad [s] \quad (265)$$

W celu znalezienia najkorzystniejszej długości linii sił w obwodzie magnetycznym, tj. l_s , należy znaleźć pochodną wyrażenia w nawiasach przy założeniu:

$$l_r \cong 0,42 \cdot l_s \quad [cm] \quad (266)$$

$$0,42 \cdot \frac{D_{re} + h_u}{k_n \cdot h_u} \cdot \sqrt[4]{I_s^9} + \frac{A_0}{1,2 \cdot k_{smin} \cdot k_{rmin}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{I_s^3}} \quad (267)$$

Biorąc pochodną powyższego wyrażenia i przyrównując do zera otrzymamy, że najkorzystniejsza długość linii sił w stali przy stałych współczynnikach k_{smin} i k_{rmin}

w przybliżeniu będzie równa:

$$l_s = 0,87 \cdot \sqrt[3]{\frac{k_n \cdot A_0 \cdot h_u}{k_{smin} \cdot k_{rmin} \cdot (D_r + h_u)}} \quad [\text{cm}] \quad (268)$$

Podstawiając wyrażenia na k_{rmin} (wzór 216) do wzoru (268) otrzymamy, że najkorzystniejsza wartość l_s jest równa:

$$l_s = 25,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{k_n \cdot k_0 \cdot A_0 \cdot h_u}{k_{smin} \cdot (k_{smin} - 1) \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})^2 \cdot (D_{re} + h_u)}} \quad [\text{cm}] \quad (269)$$

Podstawiając powyższe wyrażenia do wzoru (265) i przeprowadzając redukcję otrzymamy, że najmniejszy czas przyciągania przy najkorzystniejszej długości l_s obliczonej według wzoru (269) jest równy:

$$t_{pmin} = \frac{0,64}{10^4} \cdot \sqrt[3]{\frac{\gamma \cdot k_w \cdot D_{re}}{\rho_{ch} \cdot (D_{re} + 2h_u)}} \cdot \sqrt[4]{\frac{B_{r0} \cdot A_0^2 \cdot k_{smin} \cdot h_u \cdot k_0}{k_n \cdot (k_{smin} - 1)^2 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi}) \cdot (D_{re} + h_u)}} \quad [\text{s}] \quad (270)$$

Należy zwrócić uwagę, że pierwiastek ósmego stopnia ze współczynnika oporności szczelin powietrznych k_0 (por. wzór 213) przy $\gamma_z = 1$ i wahaniach stosunku a/d w granicach określonych wyrażeniem (114) zmienia się w granicach od 0,9 do 1,2, czyli wahania w stosunku do średniej wartości 1,05 nie przekraczają $\pm 15\%$. Wobec tego długość wcięcia kotwicy, tj. wymiar a , ma stosunkowo niewielki wpływ na minimalny czas przyciągania układu napędowego. Poza tym w przypadku braku wcięcia ($a = 0$), czyli $\gamma_z = 2$, omawiane wyrażenie posiada wartość 0,855. Należy też zwrócić uwagę, że omawiany wzór (270), określający t_{pmin} układu napędowego o nasycanej kotwicy, jest bardzo zbliżony do wzoru (235) określającego t_{pmin} układu napędowego o zwykłej kotwicy. Różnica polega jedynie na tym, że we wzorze (270) jest dodatkowo pierwiastek ósmego stopnia ze współczynnika oporności szczelin powietrznych, którego wartość niewiele różni się od jedności. Należy dodać, że przy małym wcięciu w kotwicy (wymiar a) czas t_{pmin} dla kotwicy nasycanej jest nieco mniejszy.

Obecnie można określić przekrój rdzenia przy najkorzystniejszej długości l_s , podstawiając wyrażenie (270), określające l_s , oraz wyrażenie (216), określające k_{rmin} , do wzoru (258) otrzymamy, że przekrój rdzenia jest równy:

$$s_r = \frac{980}{B_{r0}} \cdot \sqrt[3]{\frac{A_0^2 \cdot k_{smin} \cdot (D_{re} + h_u) \cdot k_0}{k_n \cdot (k_{smin} - 1)^2 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi}) \cdot h_u}} \quad [\text{cm}^2] \quad (271)$$

Porównując otrzymane wyrażenie na przekrój rdzenia w układzie napędowym o nasycanej kotwicy ze wzorem określającym przekrój rdzenia w układzie o zwykłej

kotwicy (por. wzór 229) dochodzi się do wniosku, że znów wzory są bardzo zbliżone. Różnica polega na wartości współczynnika liczbowego (980, 920) oraz na tym, że we wzorze (271) jest dodatkowo pierwiastek szóstego stopnia ze współczynnika k_0 . A więc wielkość długości wcięcia a ma stosunkowo niewielki wpływ na przekrój rdzenia ($\pm 20\%$ od wartości średniej), przy czym przy małym wcięciu przekrój rdzenia przy kotwicy nasycanej jest nieco mniejszy niż przy kotwicy zwykłej.

Wobec tego objętość materiału ferromagnetycznego w obwodzie magnetycznym będzie równa iloczynowi l_s przez s_r , a mianowicie (por. wzory 269 i 271):

$$V_s = 2,5 \frac{A_0 \cdot 10^4 \cdot l \cdot k_0}{B_{r0} \cdot (k_{smin} - 1) \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})} \quad [\text{cm}^3] \quad (272)$$

Wyrażenia na objętość materiału w obwodzie magnetycznym dla układów ze zwykłą kotwicą (wzór 230) i z nasycaną kotwicą (wzór 272) różnią się tym, że we wzorze (272) jest pierwiastek drugiego stopnia ze współczynnika oporności szczelin po wietrznych zależnej i niezależnej, który przy wyżej wspomnianych zmianach długości wcięcia w kotwicy a waha się w granicach 0,655 do 2,12, a przy braku wcięcia $a = 0$ wartość tego wyrażenia wynosi 0,538. Jak widać, przy małym wcięciu kotwicy objętość materiału dość wydatnie maleje. Jednakową objętość obwodu magnetycznego przy obu typach kotwic otrzymuje się przy $a = 0,31$ d.

Obecnie można określić amperozwoje przyciągania przy najkorzystniejszej długości l_s , a mianowicie (por. wzór 216 i 264):

$$AZ_p = 22,5 \cdot \sqrt{\frac{A_p \cdot 3}{A_0}} \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot k_{smin}^2 \cdot A_0 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi}) \cdot h_u}{(k_{smin} - 1) \cdot (D_{re} + h_u) \cdot k_0}} \quad (273)$$

Porównując otrzymany wzór na amperozwoje przyciągania ze wzorem (231), odnoszącym się do układu napędowego o zwykłej kotwicy, wzór (273), odnoszący się do układu o nasycanej kotwicy, zawiera w mianowniku pierwiastek szóstego stopnia ze współczynnika oporności szczelin powietrznych.

Wobec tego amperozwoje przyciągania AZ_p dla kotwicy z wcięciem a będą nieco mniejsze niż dla kotwicy bez wcięcia. Następnie można określić moc przyciągania P_p , która będzie równa:

$$P_p = (AZ_p)^2 \cdot \frac{1}{G_u} \quad [\text{W}] \quad (274)$$

Po podstawieniu AZ_p według wzoru (270), G_u wg wzoru (10) i przyjęciu, że długość uzwojenia

$$l_u \approx 0,35 l_s \quad [\text{cm}] \quad (275)$$

otrzymamy, że moc przyciągania jest równa:

$$P_p = \frac{17,8 \cdot A_p \cdot 10^{-3}}{\gamma \cdot k_w \cdot A_0} \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot A_0 \cdot k_{smin}^5 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})^2 \cdot (D_{re} + h_u)}{(k_{smin} - 1) \cdot h_u^2 \cdot k_0^2}} \quad [\text{W}] \quad (276)$$

Należy zwrócić uwagę, że moc przyciągania zależy od właściwości materiału obwodu magnetycznego (H_{r0} i H_k) i od współczynnika oporności szczelin powietrznych (wyrażenie 213), przy czym ten współczynnik jest w mianowniku w potęgę 0,67 (2/3), powodując efektywne zmiany mocy przyciągania P_p od 1,76 ($a = 0,03 d$) do 0,364 ($a = 0,8 d$), przy $a = 0$ zmiana wynosi 2,28.

Poza tym moc maksymalna, jaka trwale może być tracona w uzwojeniu ze względu na przyrost temperatury (por. wzór 21), będzie równa:

$$P_m = \pi \cdot (D_{re} + 2 \cdot h_u) \cdot l_u \cdot p_{ch} \quad [\text{W}] \quad (277)$$

$$P_m = \pi \cdot \frac{D_{re} + 2 \cdot h_u}{D_{re}} \cdot p_{ch} \cdot 0,35 \cdot l_s \cdot D_{re} \quad [\text{W}] \quad (278)$$

Po podstawieniu wyrażenia na l_s (wzór 270), na D_r (wzór 260) na k_{rmin} (wzór 216) otrzymamy, że maksymalna moc będzie równa:

$$P_m = \frac{980 \cdot p_{ch} \cdot (D_{re} + 2 \cdot h_u)}{\sqrt{B_{r0} \cdot h_u}} \cdot \sqrt[6]{\frac{k_n \cdot A_0^4 \cdot h_u \cdot k_0^5}{k_{smin} \cdot (k_{smin} - 1)^4 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})^5 \cdot (D_{re} + h_u)}} \quad [\text{W}] \quad (279)$$

Z powyższego wzoru widać, że moc maksymalna stosunkowo niewiele zależy od współczynnika oporności szczelin powietrznych, czyli od długości wcięcia a . Zmiany w ustalonych granicach a do 0,03 d do 0,8 d dają w efekcie zmiany P_m w granicach 0,93 do 1,14, czyli o $\pm 10\%$, przy czym przy kotwicy o dużym wcięciu moc maksymalna jest nieco większa.

Następnie dopuszczalny współczynnik przyciągania X_{pid} po podstawieniu do wzoru (22) wyrażenia na l_u (wzór 275), na AZ_p (wzór 273), na s_r (wzór 271), na l_s (wzór 269) będzie równy:

$$X_{pid} = \frac{235}{\sqrt{B_{r0}}} \cdot \sqrt{\frac{A_0}{A_p}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot k_w \cdot p_{ch} \cdot (D_{re} + 2 \cdot h_u)}{D_{re}}} \cdot \sqrt[12]{\frac{A_0^2 \cdot h_u^5 \cdot k_n^{13}}{k_n \cdot (k_{smin} - 1)^2 \cdot k_{smin}^{11} \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})^{13} \cdot (D_{re} + h_u)^5}} \quad (280)$$

Przekrój rdzenia omawianego układu jest prostokątny, przy czym stosunek boku dłuższego do krótszego oznaczymy przez m . Wobec tego przekrój rdzenia będzie równy

$$s_r = \frac{4 \cdot b^2}{m} \quad [\text{cm}^2] \quad (281)$$

W związku z powyższym szerokość ramienia jarzma będzie równa:

$$b = 0,5 \cdot \sqrt{s_r \cdot m} \quad [\text{cm}] \quad (282)$$

a szerokość rdzenia

$$2b = \sqrt{s_r \cdot m} \quad [\text{cm}] \quad (283)$$

Na podstawie założonej konstrukcji wiążącej obliczany układ napędowy z napędzanym układem sprężyn (mechanizmem), można określić potrzebny skok kotwicy δ_s , mierzony na jej brzegu w punkcie D (por. rys. 12).

Wobec tego siły, które musi dostarczyć kotwica w obu krańcowych położeniach, będą równe:

w położeniu spoczynkowym:

$$F_p = \frac{A_p}{\delta_s} \quad [\text{G}] \quad (284)$$

w położeniu pracy:

$$F_o = \frac{A_o}{\delta_s} \quad [\text{G}] \quad (285)$$

Biorąc pod uwagę wyrażenie (172) na siłę przyciągania kotwicy w stanie spoczynku, można określić siłę przyciągającą w stanie pracy, a mianowicie:

$$F_o = 0,2 \cdot (\Phi'_{r0})^2 \frac{10^{-4}}{b \cdot d} \cdot k_o \quad [\text{G}] \quad (286)$$

Początkowo rozpatrzmy przypadek kotwicy posiadającej wcięcie o długości a , tj. liczbę zależnych szczelin $\gamma_z = 1$. W tym przypadku należy założyć stosunek długości kotwicy d do szerokości jej ramion, która jest równa szerokości ramion jarzma (por. rys. 12), a mianowicie:

$$d = n \cdot b \quad [\text{cm}] \quad (287)$$

Podstawiając do wzoru (286) $\gamma_z = 1$, wyrażenia na Φ'_{r0} (wzór 209), na s_r (wzór 271), na b (wzór 282), na d (wzór 287), mnożąc obie strony równania przez δ_s i rozwiązując w stosunku do współczynnika oporności szczelin powietrznych k_o otrzymamy:

$$k_o = 8,9 \cdot \sqrt[7]{\frac{n^6 \cdot m^6 \cdot A_o^2 \cdot k_n^2 \cdot (k_{smin} - 1)^4 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})^2 \cdot h_u^2}{B_{r0}^6 \cdot \delta_s^6 \cdot k_{smin}^2 \cdot (D_{re} + h_u)^2}} \quad (288)$$

Mając wartość współczynnika oporności szczelin powietrznych k_o , można obliczyć stosunek długości kotwicy d do długości wcięcia a (por. wzór 213), mianowicie:

$$\ln \frac{d}{a} = \frac{1}{k_o - \beta} \quad (289)$$

W tabelicy 4 podano zależność zasadniczych parametrów układu napędowego od stosunku długości wcięcia a do długości kotwicy d . Z tabelicy tej widać, że najmniejszy czas przyciągania, objętość obwodu magnetycznego, maksymalna moc, jaka może być tracona w uzwojeniu, i dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa wzrastają w miarę wzrostu długości wcięcia. Natomiast moc przyciągania w miarę wzrostu długości wcięcia a wydatnie maleje. W związku z tym dla szybko działających układów napędowych należałoby dążyć do otrzymania małej wartości stosunku

Tabela 4

Zależność parametrów układu napędowego o nasycanej kotwicy od stosunku długości wcięcia a do długości kotwicy d

Określenie parametru	Długość wcięcia $a =$					
	0,03d	0,1d	0,2d	0,31d	0,5d	0,8d
Najmniejszy czas przyciągania (wzór 266)	0,9	0,93	0,97	1	1,1	1,2
Objętość materiału obwodu magnetycznego (wzór 272)	0,655	0,76	0,88	1	1,45	2,12
Maksymalna moc, jaka może być tracona w uzwojeniu (wzór 279)	0,70	0,791	0,90	1	1,38	1,86
Moc przyciągania (wzór 276)	1,75	1,46	1,2	1	0,61	0,366
Dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa (wzór 280)	0,635	0,74	0,87	1	1,49	2,26
Współczynnik oporności szczelin powietrznych (wzór 213)	0,431	0,569	0,765	1	2,05	4,525

długości wcięcia a do długości kotwicy, natomiast dla układów napędowych, przy których nie ma warunku szybkiego działania, należałoby dążyć do otrzymania dużej wartości stosunku długości wcięcia a do długości kotwicy.

W przypadku kotwicy bez wcięcia ($a = 0$, $\gamma_z = 2$) lub też założonego stosunku długości wcięcia a do długości kotwicy ($a > 0$, $\gamma_z = 1$) współczynnik oporności szczelin powietrznych jest ściśle określony. W związku z tym współczynniki m , n oraz skok kotwicy nie mogą być dowolnie wybrane, gdyż zachodzi między nimi określony związek. Biorąc pod uwagę wzór (176), (209), (281), (287) oraz znaną zależność:

$$\alpha_p - \alpha_0 = \frac{\delta_s}{d} \quad (290)$$

otrzymamy, że:

$$\frac{n \cdot m}{\delta_s} = 0,8 \cdot \frac{k_0 \cdot B_{r0}^2}{A_0} \cdot s_r \cdot 10^{-4} \quad (291)$$

Otrzymane wyrażenie (291) określa zależność współczynników n , m oraz skoku kotwicy, która powinna być brana pod uwagę przy ich doborze.

Następnie kąt nachylenia α_0 , tj. kąt nachylenia kotwicy w pozycji pracy (por. wzór 164), będzie miał postać:

$$\alpha_0 = \frac{H_k \cdot X_{0\Phi}}{\Phi'_{r0}} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot l_s}{\gamma_z \cdot (\beta + 0,5 \cdot \varphi'_k) + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}}} \quad (292)$$

Wprowadzając uproszczenie

$$\gamma_z \cdot (\beta + 0,5 \cdot \varphi'_k) + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}} \cong \gamma_z \cdot \beta + \frac{2 - \gamma_z}{\ln \frac{d}{a}} = k_0 \quad (293)$$

kąt nachylenia kotwicy w stanie pracy będzie równy:

$$\alpha_0 = \frac{H_k \cdot X_{0\Phi}}{\Phi'_{r0}} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot l_s}{k_0} \quad (294)$$

Podstawiając do wyrażenia (294) założony współczynnik $X_{0\Phi}$, przyjętą siłę powściąającą H_k , strumień zwalniania Φ'_{r0} (wzór 209), przekrój rdzenia (wzór 271), szerokość ramienia b (wzór 282), długość linii sił w obwodzie magnetycznym l_s (wzór 269) otrzymamy, że kąt α_0 będzie równy:

$$\alpha_0 = 0,82 \cdot \sqrt{m} \cdot \frac{H_k \cdot X_{0\Phi}}{\sqrt{B_{r0}}} \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot h_u}{k_{smin} \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi}) \cdot (D_{re} + h_u) \cdot \sqrt{k_0^3}}} \quad (295)$$

Mając kąt α_0 przy przyciągniętej kotwicy, można określić kąt α_p przy nie przyciągniętej kotwicy, a mianowicie:

$$\begin{aligned} \delta_s &= d \cdot (\alpha_p - \alpha_0) \\ \alpha_p &= \frac{\delta_s}{d} + \alpha_0 \end{aligned} \quad (296)$$

Po podstawieniu do wzoru (296) uprzednio określonych wielkości otrzymamy, że kąt nachylenia kotwicy α_p w stanie spoczynkowym jest równy:

$$\alpha_p = 0,064 \cdot \frac{\delta_s \cdot \sqrt{B_{r0}}}{n \cdot \sqrt{m}} \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot (k_{smin} - 1)^2 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi}) \cdot h_u}{A_0^2 \cdot k_{smin} \cdot (D_{re} + h_u) \cdot \sqrt{k_0}}} + \alpha_0 \quad (297)$$

W punkcie 4.8 było rozpatrywane optimum siły przyciągającej F w zależności od długości wcięcia kotwicy (wymiar a), przy czym okazało się, że optimum siły F występuje w przypadku, kiedy oporność obu szczelin powietrznych (zależnej i niezależnej) jest równa oporności drogi linii sił w materiale obwodu magnetycznego (por. wzór 170).

Ze wzoru (170) w przypadku przyjęcia określonej wartości długości wcięcia a można określić kąt nachylenia kotwicy α_{opt} , przy którym zachodzi najlepsze wykorzystanie energii zawartej w strumieniu magnetycznym, a mianowicie:

$$\alpha_{opt} = 2 \cdot b \cdot R_{\mu z} \cdot \frac{1}{\beta + \ln \frac{d}{a}} \quad (298)$$

Biorąc pod uwagę wzory (210), oporność drogi linii sił w materiale obwodu magnetycznego jest równa:

$$R_{\mu z} = \frac{l_s}{\mu \cdot s_r} = \frac{H_{r0} \cdot l_s}{B_{r0} \cdot s_r} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (299)$$

Wobec tego optymalny kąt nachylenia kotwicy będzie równy (por. wzór 213) określający współczynnik k_0

$$\alpha_{opt} = \frac{H_{r0} \cdot l_s \cdot 2 \cdot b}{B_{r0} \cdot s_r \cdot k_0} \quad (300)$$

Obecnie można określić stosunek α_{opt} do α_0 , tj. do kąta nachylenia kotwicy w stanie pracy (por. wzory 294 i 300)

$$\frac{\alpha_{opt}}{\alpha_0} = \frac{H_{r0}}{H_k \cdot X_{0\Phi}} \quad (301)$$

Otrzymaliśmy dosyć ciekawe stwierdzenie, że stosunek kąta, przy którym zachodzi najlepsze wykorzystanie energii zawartej w strumieniu roboczym, do kąta w pozycji pracy równa się stosunkowi natężenia pola H_{r0} , potrzebnego do wywołania indukcji B_{r0} , do iloczynu siły powściągającej przez współczynnik bezpieczeństwa zwalniania. Należy zwrócić uwagę, że przy specjalnym materiale (stali przekątnikowej) omawiany stosunek wynosi rzędu trzech, a tymczasem przy zwykłej stali około jedności, a nawet poniżej jedności, to znaczy że w czasie ruchu kotwicy nie ma momentu, w którym zachodzi najlepsze wykorzystanie energii zawartej w strumieniu roboczym.

Należy zwrócić uwagę, że przy prostokątnym przekroju rdzenia dla otrzymania tej samej sprowadzonej przewodności G_u (stosunek h_u/D_r pozostaje bez zmian) należy zużyć większą ilość miedzi. Biorąc pod uwagę, że dla obliczenia ekwiwalentnej średnicy rdzenia prostokątnego należy jego obwód podzielić przez liczbę π

$$\pi D_{re} = 4 \cdot b + \frac{4 \cdot b}{m} = 4 \cdot b \cdot \frac{m+1}{m} \quad [\text{cm}] \quad (302)$$

a podstawiając wzór (282)

$$D_{re} = 2 \cdot \frac{m+1}{\pi \cdot \sqrt{m}} \cdot \sqrt{s_r} \quad [\text{cm}] \quad (303)$$

Wobec tego stosunek ekwiwalentnej średnicy rdzenia o przekroju prostokątnym do średnicy rdzenia okrągłego o tym samym przekroju będzie równy

$$\frac{D_{re}}{D_r} = \frac{m+1}{\sqrt{\pi \cdot m}} \quad (304)$$

Objętość uzwojenia o długości 1 cm dla rdzenia okrągłego jest równa

$$v_m = \pi \cdot (D_r + h_u) \cdot h_u \cdot 1 \quad [\text{cm}^3] \quad (305)$$

$$v_m = \pi \cdot D_r^2 \cdot \left(\frac{h_u}{D_r}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{h_u}{D_r}\right)\right] \quad [\text{cm}^3] \quad (306)$$

Wobec tego objętość uzwojenia o długości 1 cm dla rdzenia prostokątnego będzie równa

$$v'_m = \pi \cdot D_{re}^2 \cdot \left(\frac{h_u}{D_{re}}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{h_u}{D_{re}}\right)\right] \quad [\text{cm}^2] \quad (307)$$

Przy tym samym stosunku wysokości uzwojenia do średnicy rdzenia ($h_u/D_r = \text{const}$) stosunek objętości uzwojenia przy rdzeniu prostokątnym do objętości uzwojenia przy rdzeniu okrągłym będzie równy

$$\left[\frac{D_{re}}{D_r}\right]^2 = \frac{(m+1)^2}{\pi \cdot m} \quad (308)$$

W tabelicy 5 podano omawiane zwiększenie objętości miedzi w zależności od stosunku m .

Tabela 5

Zależność objętości miedzi od stosunku m

m	1	2	3	4	5	6
$\frac{(m+1)^2}{m}$	1,27	1,43	1,7	2	2,3	2,6

Uwaga: $m = 1$ — rdzeń o przekroju kwadratowym

Z tabelicy 5 można wyciągnąć wniosek, że przy rdzeniu prostokątnym należałoby z uwagi na zmniejszenie zużycia miedzi stosować mniejsze wartości stosunku wysokości uzwojenia do średnicy rdzenia (h_u/D_{re}).

Interesująca jest jeszcze wartość ekwiwalentnej stałej czasowej obwodu uzwojenia przy najkorzystniejszej długości obwodu strumienia roboczego. Biorąc pod uwagę wzór (261) i podstawiając do niego wyrażenie na G_u (wzór 10), na $R_{\mu n}$ (wzór 27), na $R_{\mu min}$ (wzór 218), na $k_{r min}$ (wzór 216) i na l_s (wzór 269) otrzymamy, że ogólna stała czasowa obwodu uzwojenia będzie równa:

$$\tau_{pe} = \frac{14,8 \cdot \gamma \cdot k_w}{10^3} \cdot \sqrt[3]{\frac{A_0^2 \cdot h_u^2 \cdot k_0^2}{k_n \cdot k_{s min}^2 \cdot (k_{s min} - 1)^2 \cdot (H_{r0} + H_k \cdot X_{0\Phi})^4 \cdot (D_{re} + h_u)^2}} \quad [\text{s}] \quad (309)$$

6.3. Przebieg obliczenia

6.3.1. Indukcja w rdzeniu

Indukcję w rdzeniu określa się w zupełnie analogiczny sposób jak w przypadku układu napędowego o zwykłej kotwicy (por. punkt 5.2.1), a mianowicie:

$$B_{r,0} = 0,65 \cdot \frac{B_n}{X_{t\Phi}} \quad [\text{Mx}] \quad (310)$$

gdzie 0,65 — współczynnik uwzględniający częściowe przechodzenie strumienia rozproszenia przez rdzeń i ramiona jarzma.

W przeciętnych układach napędowych współczynnik $X_{t\Phi}$ powinien zawierać się w granicach $1,4 \div 1,7$. Przy przyjęciu większej wartości współczynnika $X_{t\Phi}$ ulegają zmniejszeniu

- indukcja zwalniania $B_{r,0}$,
- natężenie pola magnetycznego $H_{r,0}$ potrzebnego do wywołania indukcji równej $1,4 \cdot B_{r,0}$ (patrz punkt 5.2.1).

Wobec tego zwiększenie wartości współczynnika $X_{t\Phi}$ powoduje:

- zwiększenie współczynnika oporności szczelin powietrznych (por. wzór 213),
- zwiększenie wymiarów układu napędowego (por. wzór 272),
- niewielkie zmniejszenie amperozwojów i mocy przyciągania (por. wzory 273 i 276).

Wpływ wartości siły powściągającej H_k materiału obwodu magnetycznego na parametry obliczonego układu napędowego został podany w punkcie 5.2.1 i tablicy 1.

6.3.2. Wymiary obwodu magnetycznego i uzwojenia

Punktem wyjściowym do obliczeń wymiarów obwodu magnetycznego jest przyjęcie:

- skoku kotwicy δ_s , mierzonego na jej brzegu (por. rys. 12). Skok ten należy określić na podstawie przyjętej konstrukcji przenoszącej ruch kotwicy do napędzanego układu sprężyn (mechanizmu);
- stosunku boków prostokątnego przekroju rdzenia m (por. wzór 281), który może się zmieniać w granicach od 4 do 6.

Należy zwrócić uwagę, że przy większej wartości stosunku m mamy większe zużycie miedzi przy wykonywaniu uzwojenia (por. tabl. 5), a przy mniejszej wartości stosunku m mogą pojawić się trudności technologiczne przy wykonywaniu rdzenia i jarzma (duża grubość materiału). Poza tym zwiększenie stosunku m powoduje zwiększenie prawie proporcjonalne współczynnika oporności szczelin powietrznych (por. wzór 288), którego wpływ na parametry obliczonego układu napędowego podaje tablica 4, na przykład moc przyciągania P_p maleje, a objętość obwodu magnetycznego V_s rośnie. Następnie w przypadku ustalonej

T a b l i c a 6

Zależność parametrów układu napędowego o nasyconej kotwicy od minimalnej wartości współczynnika wzrostu strumienia roboczego $k_{s \min}$

Określenie parametru	Wartość współczynnika $k_{s \min}$						
	1,5	2	2,5	3	4	5	6
Najmniejszy czas przyciągania $t_{p \min}$ (wzór 270)	1,29	1	0,90	0,82	0,75	0,68	0,64
Objętość obwodu magnetycznego V_s (wzór 272)	1,40	1	0,6	0,43	0,362	0,27	0,224
Moc maksymalna P_m (wzór 279)	1,44	1	0,79	0,665	0,513	0,425	0,371
Moc przyciągania P_p (wzór 276)	0,95	1	1,14	1,30	1,63	2,03	2,45
Dopuszczalny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania (wzór 280)	1,24	1	0,83	0,71	0,56	0,457	0,39

wartości współczynnika oporności szczelin powietrznych k_0 (brak wcięcia w kotwicy, tj. $a = 0$, lub z góry narzuconej długości tego wcięcia) zwiększenie omawianego stosunku m powoduje zmniejszenie współczynnika wzrostu strumienia $k_{s \min}$, którego wpływ na parametry układu napędowego został podany w tablicy 6, na przykład moc przyciągania P_p maleje, a objętość obwodu magnetycznego V_s rośnie.

Następnie zwiększenie stosunku m powoduje zwiększenie kąta nachylenia kotwicy w stanie pracy α_0 (por. wzór 295) i zmniejszenie kąta odpowiadającego skokowi kotwicy, tj. $\alpha_p - \alpha_0$ (por. wzór 297). Ostatecznie można stwierdzić, że dla układów szybko działających należałoby przyjmować mniejsze wartości stosunku m , a dla układów napędowych o małym zużyciu mocy należy przyjmować większe wartości stosunku m ;

- stosunku długości kotwicy do szerokości ramiona jarzma n (por. wzór 297), który może się zawierać w granicach 2—6. Przy wyborze wartości stosunku n muszą być brane pod uwagę względy konstrukcyjne, na przykład należałoby dążyć, aby przekrój poprzeczny szczeliny powietrznej między rdzeniem a kotwicą był zbliżony do kwadratu o wymiarach $2bx$ ($d - a$). W tym przypadku mamy najmniejszy wpływ zjawisk brzegowych. Poza tym stosunek n ma taki sam wpływ na parametry układu napędowego, jak wyżej omówiony stosunek m , a mianowicie zwiększenie stosunku n powoduje zmniejszenie mocy przyciągania P_p i zwiększenie objętości obwodu magnetycznego V_s . Niezależnie od powyższego zwiększenie stosunku n powoduje proporcjonalne zmniejszenie kąta odpowiadającego skokowi kotwicy (por. wzór 297);
- współczynnika oporności obwodu strumienia rozproszenia k_n (por. punkt 2.6). Na wartość tego współczynnika nie mamy żadnego wpływu i należy go przyjmować w granicach $3,5 \div 4$;

- stosunku wysokości uzwojenia do ekwiwalentnej średnicy rdzenia, tj. h_u/D_{re} . Wartość tego stosunku, zgodnie z uwagami podanymi w punkcie 2.7 (por. wyrażenie 36), powinna się zawierać w granicach 0,8 do 1, przy czym należałoby uwzględnić uwagi podane w punkcie 6.2 (wyrażenie 308 i tablica 5) dotyczące zużycia miedzi na uzwojenie;
- stosunku długości kotwicy do długości wcięcia, tj. d/a . W przypadku narzucania z góry stosunku długości kotwicy do długości wcięcia współczynnik oporności szczelin powietrznych k_0 jest również ściśle określony (por. wzór 213). W tych przypadkach przy przyjmowaniu wartości współczynników n , m oraz skoku kotwicy δ_s musi być zachowana zależność podana we wzorze (291). Do tych przypadków należy zaliczyć układ napędowy o kotwicy bez wcięcia ($a = 0$; $\gamma_z = 2$);
- minimalnej wartości współczynnika wzrostu strumienia roboczego k_{smin} przy przejściu kotwicy z jednego krańcowego położenia w drugie (por. wzór 132). Wartość współczynnika k_{smin} ustala się w przypadkach, kiedy stosunek długości kotwicy do długości wcięcia a nie jest z góry ustalony. Wpływ współczynnika wzrostu strumienia k_{smin} na parametry układu napędowego pokazuje tablica 6;
- współczynnika bezpieczeństwa zwalniania w odniesieniu do wartości strumienia roboczego $X_{0\Phi}$ (por. wzór 47).

Wpływ wartości współczynnika wzrostu strumienia roboczego k_{smin} i współczynnika bezpieczeństwa zwalniania $X_{0\Phi}$ na parametry obliczanego układu napędowego jest podobny jak w przypadku układu napędowego o zwykłej kotwicy (por. punkt 5.2.2 oraz tabl. 2 i 6), tzn. większa wartość tych współczynników powinna być przyjmowana dla układów napędowych o krótkim czasie działania i dużym obciążeniu. Natomiast dla układów napędowych, od których nie wymaga się zbyt krótkiego czasu działania, ale zależy na małym zużyciu mocy, należy przyjmować mniejsze wartości na omawiane współczynniki. Należy zwrócić uwagę, że przy małych wartościach k_{smin} i $X_{0\Phi}$ moc przyciągania P_p posiada małą wartość, co przy przyjęciu normalnego współczynnika bezpieczeństwa przyciągania, np. $X_{pi} = 2$, da również małą wartość mocy ustalonej pobieranej przez układ napędowy podczas pracy ($P_u = X_{pi}^2 \cdot P_p$).

Po ustaleniu wartości wyżej wymienionych współczynników i stosunków, tj. δ_s , m , n , k_n , h_u/D_r , d/a , k_0 , k_{smin} , $X_{0\Phi}$ (stosunek d/a musi być ustalany lub obliczany), można przystąpić do obliczania wymiarów obwodu magnetycznego.

- a. Współczynnik oporności szczelin powietrznych w przypadkach ustalania z góry stosunku długości kotwicy do długości wcięcia, tj. $a = 0$ lub d/a założone, obliczamy ze wzoru (213). Natomiast w przypadkach nieustalania z góry długości wcięcia w kotwicy współczynnik k_0 obliczamy według wzoru (288).
- b. Przekrój rdzenia s_r obliczamy wg wzoru (271).
- c. Długość linii sił w obwodzie magnetycznym l_s obliczamy według wzoru (269).
- d. Szerokość ramienia jarzma obliczamy według wzoru (282).

- e. Szerokość rdzenia równa jest $2 \times b$, a grubość rdzenia $\frac{2b}{m}$;
 f. Ekwiwalentną średnicę rdzenia oblicza się ze wzoru (303);
 g. Wysokość uzwojenia oblicza się ze wzoru

$$h_u = D_{re} \cdot \left(\frac{h_v}{D_{re}} \right) \quad [\text{cm}] \quad (311)$$

gdzie $\frac{h_u}{D_{re}}$ uprzednio założony stosunek.

- i. Długość kotwicy oblicza się ze wzoru (287).
 j. Długość wcięcia w kotwicy oblicza się według wzoru

$$a = \frac{d}{\left(\frac{d}{a} \right)} \quad [\text{cm}] \quad (312)$$

gdzie: d/a — uprzednio założony lub obliczony według wzoru (289) stosunek długości kotwicy do długości wcięcia.

- k. Długość rdzenia oblicza się ze wzoru

$$l_r = 0,5 \cdot l_s - (b + h_u) \quad [\text{cm}] \quad (313)$$

l. Długość uzwojenia obliczamy według wzoru

$$l_u = l_r - 0,5 \cdot (b + d - a) \quad [\text{cm}] \quad (314)$$

6.3.3. Oporności obwodu strumienia roboczego

- a. Kąt nachylenia kotwicy w stanie pracy obliczamy według wzoru (295).
 b. Kąt nachylenia kotwicy w stanie spoczynku oblicza się ze wzoru (297).
 c. Współczynnik oporności obwodu magnetycznego $k_{r_{min}}$ obliczamy według wzoru (216).
 d. Minimalną oporność obwodu strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy oblicza się ze wzoru (217).
 e. Minimalną oporność obwodu strumienia roboczego przy nie przyciągniętej kotwicy oblicza się według wzoru (218).
 f. Maksymalną oporność obwodu strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy oblicza się ze wzoru (por. wzory 124 i 129).

$$R'_{\mu_{max}} = R'_{\mu_{min}} + \frac{\alpha_0}{2 \cdot b} \cdot \gamma_z \cdot (1 - \beta) \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (315)$$

$$\beta = 0,145$$

- g. Maksymalną oporność obwodu strumienia roboczego przy nie przyciągniętej kotwicy oblicza się według wzoru (por. wzory 123 i 128)

$$R_{\mu max} = R_{\mu min} + \frac{\alpha_p}{2 \cdot b} \cdot \gamma_z \cdot (1 - \beta) \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (316)$$

$$\beta = 0,145$$

- h. Względne minimalne oporności obwodu strumienia roboczego oblicza się przy przyciągniętej kotwicy ze wzoru

$$r'_{\mu min} = \frac{R'_{\mu min}}{R_{\mu max}} \quad (317)$$

przy nie przyciągniętej kotwicy ze wzoru

$$r_{\mu min} = \frac{R_{\mu min}}{R_{\mu max}} \quad (318)$$

- i. Maksymalną oporność zależnej szczeliny powietrznej przy przyciągniętej kotwicy oblicza się według wzoru (127).
 k. Maksymalną oporność zależnej szczeliny powietrznej przy nie przyciągniętej kotwicy oblicza się według wzoru (126).
 l. Względne maksymalne oporności zależnej szczeliny powietrznej oblicza się przy przyciągniętej kotwicy ze wzoru

$$r_{\mu s max} = \frac{R'_{\mu s max}}{R_{\mu max}} \quad (319)$$

przy nie przyciągniętej kotwicy ze wzoru

$$r_{\mu s max} = \frac{R_{\mu s max}}{R_{\mu max}} \quad (320)$$

6.3.4. Parametry uzwojenia i wartości strumienia roboczego

- a. Sprowadzoną oporność uzwojenia oblicza się ze wzoru (10).
 b. Stałą czasową obwodu uzwojenia w stosunku do strumienia rozproszenia oblicza się ze wzoru (por. wzory 27 i 29)

$$\tau_s = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot (D_{re} + h_w)}{10^8 \cdot k_n \cdot h_u} \cdot l_r \cdot G_u \quad [\text{s}] \quad (321)$$

- c. Minimalną stałą czasową obwodu uzwojenia w stosunku do strumienia roboczego przy przyciągniętej kotwicy oblicza się ze wzoru (por. wzór 183)

$$\tau'_{r min} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot G_u}{10^8 \cdot R'_{\mu max}} \quad [\text{s}] \quad (322)$$

- d. Minimalną stałą czasową obwodu uzwojenia w stosunku do strumienia roboczego przy nie przyciągniętej kotwicy oblicza się ze wzoru (por. wzór 183)

$$\tau_{rmin} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot G_u}{10^8 \cdot R_{\mu max}} \quad [s] \quad (323)$$

- e. Maksymalną wartość strumienia roboczego (kotwica całkowicie nasycona) oblicza się ze wzoru (121).
f. Strumień przyciągania kotwicy oblicza się ze wzoru (175), a jego względną wartość ze wzoru

$$\varphi_{rp} = \frac{\Phi_{rp}}{\Phi_{rmax}} \quad (324)$$

- g. Strumień zwalniania kotwicy oblicza się ze wzoru (176), a jego względną wartość ze wzoru

$$\varphi'_{r0} = \frac{\Phi'_{r0}}{\Phi_{rmax}} \quad (325)$$

- h. Maksymalne amperozwoje przy przyciągniętej kotwicy oblicza się ze wzoru (134).
i. Maksymalne amperozwoje przy nie przyciągniętej kotwicy oblicza się ze wzoru (133).
k. Amperozwoje przyciągania kotwicy oblicza się ze wzoru (por. wzór 153)

$$AZ_p = AZ_{max} \cdot (r_{\mu min} + 0,5 \cdot r_{\mu s max} \cdot \varphi_{rp}) \cdot \varphi_{rp} \quad (326)$$

- l. Amperozwoje zwalniania kotwicy oblicza się ze wzoru (por. wzór 153)

$$AZ_0 = AZ'_{max} \cdot (r'_{\mu min} + 0,5 \cdot r'_{\mu s max} \cdot \varphi'_{r0}) \cdot \varphi'_{r0} \quad (327)$$

- m. Zależność współczynnika bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do ustalonej wartości amperozwojów do współczynnika bezpieczeństwa przyciągania w odniesieniu do ustalonej wartości strumienia oblicza się według wzoru (156).
n. Moc przyciągania oblicza się ze wzoru

$$P_p = (AZ_p)^2 \cdot \frac{1}{G_u} \quad [W] \quad (328)$$

- o. Stałą czasową obwodu uzwojenia podczas przelotu kotwicy oblicza się ze wzoru (198).
p. Współczynnik wzrostu strumienia podczas przelotu kotwicy oblicza się ze wzoru (177).
r. Maksymalną wartość współczynnika wzrostu oporności obwodu strumienia roboczego przy przejściu kotwicy z jednego krańcowego położenia w drugie oblicza się według wzoru (125).
s. Stosunek stałych czasowych obwodu uzwojenia przy przejściu kotwicy z jednego krańcowego położenia w drugie oblicza się według wzoru (199).

- t. Potrzebny współczynnik bezpieczeństwa przyciągania X_{pi} określa się dla żadanego czasu przyciągania t_p na podstawie wykresu $t_p = f(X_{pi})$, wykonanego według wzoru (200).
- u. Moc ustaloną traconą w uzwojeniu oblicza się według wzoru

$$P_u = X_{pi}^2 \cdot P_p \quad [\text{W}] \quad (329)$$

7. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

W tablicy 7 podano przykładowo porównanie obliczonych wymiarów w neutralnym przekąźniku telefonicznym B1 z wymiarami rzeczywistymi. Porównanie dało wynik dodatni.

Następnie w tablicach 8 i 9 przedstawiono wyniki obliczeń układów napędowych przeprowadzonych zgodnie z dyspozycjami podanymi w punktach 5.2 i 6.3. W tablicy 8 podane wyniki odnoszą się do układu napędowego o zwykłej kotwicy, przy czym przykłady 1 i 2 dotyczą układu mocno obciążonego, gdyż obciążenie kotwicy w stanie spoczynku wynosi 187 G, a w stanie pracy 625 G, przy skoku kotwicy 0,08 cm. Natomiast przykład 3 dotyczy układu mało obciążonego, gdyż obciążenie kotwicy w stanie spoczynku wynosi 125 G, a w stanie pracy 250 G. Należy zwrócić uwagę, że przykłady 1 i 2 różnią się od siebie wartością przyjętego współczynnika wzrostu strumienia k_s , który dla przykładu 1 wynosi $k_s = 3$, a dla przykładu 2 wynosi $k_s = 2$.

Porównując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że przy małej wartości współczynnika wzrostu k_s układ napędowy ma większe wymiary, mniejszą moc przyciągania i nie nadaje się do stosowania w układach, w których zależy na szybkiej pracy.

Tablica 7

Porównanie obliczonych wymiarów w neutralnym przekąźniku telefonicznym B1 z wymiarami rzeczywistymi

Wymiar	Obliczony	Rzeczywisty
Długość rdzenia	7,0 cm	7,0 cm
Średnica rdzenia	0,89 cm	0,90 cm
Wysokość uzwojenia	0,8 cm	0,8 cm
Średnica nabiegunnika	1,4 cm	1,4 cm
Skok kotwicy	0,08 cm	0,08 cm
Wysokość sztyftu antymagnetycznego	0,003 cm	0,0025 cm

Średnie wartości potrzebnych sił przyciągających spotykanych w przekąźniku B1 są równe:

w stanie spoczynku 125 G

w stanie pracy 500 G

Wartości te zostały przyjęte w obliczeniach jako dane wyjściowe.

Tablica 8

Wyniki obliczeń układów napędowych o zwykłej kotwicy

Parametr	Jednostka	Przykład		
		1	2	3
Praca początkowa kotwicy A_p	Gcm	15	15	5
Praca końcowa kotwicy A_o	Gcm	50	50	10
Współczynnik wzrostu strumienia k_s		3	2	3
Średnica rdzenia D_r	cm	0,98	1,15	0,58
Długość rdzenia l_r	cm	6,2	9,6	3,75
Średnica nabiegunnika	cm	1,42	1,61	0,93
Skok kotwicy δ_s	cm	0,08	0,08	0,04
Amperozwoje przyciągania AZ_p	A	156	151	110
Moc przyciągania P_p	W	0,13	0,075	0,104
Żądany czas przyciągania t_p	s	0,025	0,025	0,010
Moc ustalona P_u dla osiągnięcia czasu t_p	W	1,5	5,2	0,81
Objętość stali V_s	cm	11,2	23,7	2,36

Obliczenia wykonano dla materiału o

$$B_n = 16000 \text{ Gs}$$

$$H_{r0} = 6 \text{ Oe}$$

$$H_k = 0,9 \text{ Oe}$$

Poza tym przyjęto

$$X_{t\phi} = 1,4$$

$$X_{o\phi} = 2$$

$$h_u/D_r = 0,9$$

W tabelicy 9 podane wyniki obliczeń odnoszą się do układu napędowego o nasyconej kotwicy, przy czym przykłady 4 i 5 dotyczą układu mocno obciążonego, gdyż obciążenie kotwicy w stanie spoczynku wynosi 83 G, a w stanie pracy 278 G, przy skoku kotwicy 0,18 cm.

Przykłady 6 i 7 dotyczą układów mało obciążonych, gdyż w przykładzie 6 obciążenie kotwicy w stanie spoczynku wynosi 50 G, a w stanie pracy 100 G, przy skoku kotwicy 0,1 cm, natomiast w przykładzie 7 obciążenie kotwicy w stanie spoczynku wynosi 42 G, a w stanie pracy 84 G, przy skoku kotwicy 0,12 cm. Należy zwrócić uwagę, że przykłady 4 i 5 różnią się od siebie wartością przyjętego współczynnika wzrostu strumienia roboczego $k_{s,min}$, który dla przykładu 4 wynosi $k_{s,min} = 3$, a dla przykładu 5 wynosi $k_{s,min} = 2$. Natomiast przykłady 6 i 7 różnią się tym, że w przykładzie 6 kotwica układu napędowego ma wcięcie, którego wielkość została obliczona, a w przykładzie 7 kotwica układu napędowego nie ma wcięcia.

Porównując wyniki obliczeń przedstawione w tabelicy 9 (przykłady 4, 5 i 6 z wynikami podanymi w tabelicy 8 — przykłady 1, 2 i 3), można stwierdzić, że wymiary układów napędowych z kotwicą zwykłą i kotwicą nasyconą są zbliżone przy tych samych wartościach współczynnika wzrostu strumienia (k_s ; $k_{s,min}$) i przy tym samym obciążeniu. Jednak w przypadku 5 (kotwica nasycona) moc przyciągania P_p i moc ustalona P_k , potrzebne do uzyskania tego samego czasu t_p , są znacznie mniejsze niż w przypadku 2. Poza tym moc ustalona P_u , potrzebna do uzyskania czasu $t_p =$

Tablica 9

Wyniki obliczeń układów napędowych o nasyczonej kotwicy

Parametr	Jednostka	Przykład			
		4	5	6	7
Praca początkowa kotwicy A_p	Gcm	15	15	5	5
Praca końcowa kotwicy A_0	Gcm	50	50	10	10
Współczynnik wzrostu strumienia $k_{s\ min}$		3	2	3	1,5
Szerokość rdzenia $2b$	cm	1,75	2,0	1,05	1,1
Grubość rdzenia $2b/m$	cm	0,42	0,5	0,26	0,38
Skok kotwicy δ_s	cm	0,18	0,18	0,1	0,12
Amperozwoje przyciągania AZ_p	A	154	75	122	151
Moc przyciągania P_p	W	0,15	0,026	0,162	0,195
Żądany czas przyciągania t_p	s	0,025	0,025	0,010	0,010
Moc ustalona dla P_u osiągnięcia czasu t_p	W	1,66	2,13	0,83	2,07
Objętość stali	cm ³	12,8	22,2	2,6	4,7

Obliczenia wykonano dla materiału
obwodu magnetycznego o

$$B_n = 16000 \text{ Gs}$$

$$H_{r0} = 6 \text{ Oe}$$

$$H_k = 0,9 \text{ Oe}$$

Poza tym przyjęto

$$X_{t\phi} = 1,4$$

$$X_{0\phi} = 2$$

$$h_{ul} D_r = 0,8$$

= 0,025 s, w przypadku 5 jest większa niż w przypadku 1. W związku z tym można wyciągnąć wniosek, że układ napędowy o nasyczonej kotwicy powinien być stosowany w przypadkach, kiedy nie zależy na zbyt szybkiej pracy, a jest postawiony warunek minimalnej mocy pobieranej przez urządzenia. Na przykład przy założeniu normalnego współczynnika bezpieczeństwa przyciągania $X_{pi} = 2$ moc ustalona P_u

dla przykładu 1 wynosi 0,52 W,

„ 2 „ 0,3 W,

„ 4 „ 0,6 W,

„ 5 „ 0,104 W.

Porównując przykłady 6 i 7, tj. układ z kotwicą, która ma wcięcie, i układ z kotwicą bez wcięcia, można dojść do wniosku, że kotwica bez wcięcia daje gorsze rezultaty, gdyż wymiary układu, moc przyciągania P_p i moc ustalona dla uzyskania czasu $t_p = 0,010$ są dla układu z kotwicą bez wcięcia znacznie większe. Należy zwrócić uwagę, że w przykładzie 7 (układ z kotwicą bez wcięcia) należało zastosować minimalny współczynnik $k_{s\ min} = 1,5$, tj. wartość dla uzyskania w przybliżeniu kwadratowego kształtu szczeliny między kotwicą a rdzeniem (długość kotwicy $d = 1,13$ cm). Zwiększenie wartości $k_{s\ min}$ powoduje zmniejszenie i tak już małej długości kotwicy.

K. Kassenberg

РАСЧЁТ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА

Резюме

В многих устройствах в области телефонии, автоматики и других областях связи и в случае потребности приведения в движение механизмов или исполнения небольшой механической работы (до 500 Гсм), являются полезными электромагнитные приводы. Применение приводов этого типа обосновывают: простая конструкция, эластичность локализации помехостойкость и постоянство монтажа.

В статье подробно представлен точный метод расчёта параметров электромагнитного привода; правильность этого метода подтверждает расчёт некоторых типов электромагнитных реле, употребляемых до сих пор в области связи.

K. Kassenberg

CALCULATION OF ELECTROMAGNET DRIVING DEVICES

Summary

In many arrangements in the field of switching, automatica and in other domains where the necessity exists to create motion or perform some small mechanical labor (up to 500 Gcm), the electromagnet drive devices are very helpful.

This kind of mechanical drive is found to be convenient thanks to its simple construction, elasticity in localization, interference independence and mounting constancy.

The paper presents in detail a precise calculating method enabling the determination of electromagnet drive parameters. The correctness of the method has been proved on some examples of calculations concerning some basic relay types, used till now in the field of switching.

K. Kassenberg

CALCUL DES DISPOSITIFS DE PROPULSION PAR ÉLECTRO-AIMANT

Résumé

Dans beaucoup d'appareils de commutation, d'automatique et d'autres, quand on a besoin de provoquer un mouvement ou d'exécuter de petits travaux mécaniques (jusqu'à 500 Gcm), il y a du profit à utiliser des dispositifs de propulsion par électro-aimant.

Ce genre de propulsion est recommandé à cause de sa simple construction, facilité de localisation, indifférence aux perturbations et stabilité du montage.

L'auteur présente la méthode de calcul en détail pour fixer les paramètres de la propulsion par électro-aimant et il vérifie la justesse de cette méthode en donnant comme exemple le calcul de plusieurs types des relais utilisés jusqu'à présent dans les télécommunications.

K. Kassenberg

BERECHNUNG DER ELEKTROMAGNETISCHEN ANTRIEBSSYSTEME

Z u s a m m e n f a s s u n g

In vielen Einrichtungen der Schalttechnik, Automatik und dergleichen, wo es sich eine Notwendigkeit ergibt, eine Bewegung zu veranlassen und kleine mechanische Arbeit (bis 500 Gcm) zu leisten, ist die Anwendung von elektromagnetischen Antriebssystemen zweckmässig. Als Vorteile dieser Form des Antriebes kann man erwähnen: Baueinfachheit, Lokalisierungsfreiheit, Unempfindlichkeit gegen Störungen und Montagefestigkeit.

Der Verfasser gibt ausführliche Berechnungsmethode von einzelnen Parametern des elektromagnetischen Antriebes an und prüft die Richtigkeit dieser Methode in Berechnungsbeispielen an einigen, bisher in der Schalttechnik verwendeten Relaisstypen.

WYDAWNICTWA KOMUNIKACJI i ŁĄCZNOŚCI — WARSZAWA 1971

Wydanie 1. Nakład 550+60 egz. Ark. wyd. 6,38. Ark. druk. 5,75. Oddano do składania w sierpniu 1971. Podpisano do druku i druk ukończono w grudniu 1971. Papier druk. sat. kl. V 70 g. 70×100 cm z Włocławka. Zam. P/137/71. K/6606.

