

doi:10.15199/48.2024.02.42

# Symulacyjne badanie właściwości dynamiczno-termicznych ultra-szybkiego napędu indukcyjno-dynamicznego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań ultraszybkiego napędu indukcyjno-dynamicznego o dużej energii początkowej baterii kondensatorów. Celem badań było symulacyjne określenie właściwości dynamicznych i termicznych, na podstawie których można wyznaczyć parametry krytyczne zasilania i wymiary cewki miedzianej oraz dysku dwuwarstwowego gwarantujące powtarzalną pracę napędu. Wyznaczone parametry muszą zapewniać oczekiwaną dynamikę poruszającego się dysku nie przekraczając przy tym dopuszczalnej temperatury cewki i dysku.

**Abstract.** The article presents the results of research on an ultra-fast induction-dynamic drive with a high initial energy of a capacitor bank. The aim of the research was to simulate the dynamic and thermal properties on the basis of which it is possible to determine the critical parameters of the copper coil and the double-layer disc, guaranteeing repeatable operation of the drive. The determined parameters must ensure the expected dynamics of the moving disc without exceeding the permissible temperature of the coil and the disc. (*Simulation study of the dynamic-thermal properties of an ultra-fast inductive-dynamic drive*)

**Słowa kluczowe:** napęd=siłownik, wyłączniki hybrydowe AC, przyspieszenie, temperatura.

**Keywords:** drive=actuator, AC hybrid short-circuit breakers, acceleration, temperature.

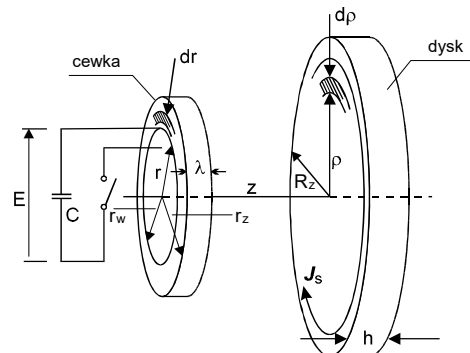
## Wstęp

W wielu urządzeniach przemysłowych wymagane jest ultraszybkie przemieszczenie elementu ruchomego. Do najszybszych napędów ruchu prostoliniowego należą siłowniki elektrodynamiczne nie tylko ze względu na możliwość osiągnięcia dużych przyspieszeń, ale także ze względu na bardzo krótki czas reakcji, rozumiany jako czas od impulsu inicjującego zadziałanie napędu do obserwowalnego ruchu. Klasyczne napędy sprężynowe i napędy elektromagnetyczne nie sprawdzają się w praktycznych warunkach pracy wymagających ekstremalnie krótkich czasów reakcji (poniżej 25  $\mu$ s). Poza tym powtarzalność napędu sprężynowego zmienia się w okresie eksploatacji. Podobne problemy z powtarzalnością występują w przypadku układów z napędem wybuchowym. Zasada działania napędu elektrodynamicznego (rys. 1a) opiera się na zjawisku Thomsona [1,2], gdzie cewka zasilana jest impulsowym prądem z baterii kondensatorów. Pole cewki indukuje prądy wirowe w dysku sprzężonym magnetycznie z cewką. Wynikiem tego oddziaływania jest znaczna siła powodująca ruch dysku. Ze względu na zjawisko indukcji tego typu siłowniki elektrodynamiczne często nazywane są napędami indukcyjno-dynamicznymi (NID). Z powodu indukowania się w dysku dużych prądów wirowych, w napędach zachodzą zarówno zjawiska elektrodynamiczne, termiczne, jak i mechaniczne. W przypadku nieodpowiedniego doboru parametrów napędu zjawiska te może charakteryzować sprzężenie silne. W elektrotechnice przemysłowej napędy ruchu prostoliniowego są stosowane głównie w wyłącznikach. Szczególnie szybko rozwijającym się typem łączników są ultraszybkie zwarcie wyłączniki hybrydowe, których napędy muszą spełniać bardzo wysokie wymagania, takie jak: krótkie czasy reakcji, bardzo dobra powtarzalność i długotrwała niezawodność [1,3,4,5].

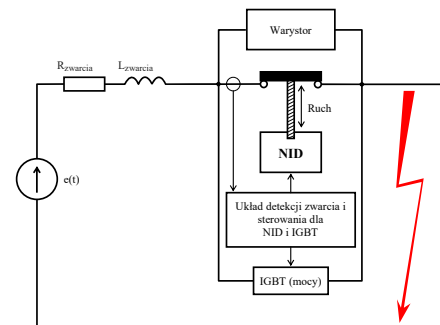
Na rys. 1b przedstawiono przykład wyłącznika hybrydowego, w którym bezłukowe wyłączanie prądu w krótkim czasie jest możliwe dzięki dynamicznej pracy i powtarzalności tych napędów. Dlatego napęd elektrodynamiczny powinien być tak zaprojektowany, aby nie przekraczać parametrów krytycznych, tj. takich, które mogłyby trwale zdefiniować dysk lub uszkodzić izolację cewki, co spowodowałoby utratę powtarzalności działania napędu a sprzężenia zachodzących zjawisk magneto-termo-sprężystych należałoby uznać za silne. Przyjęcie

założenia nieprzekraczalności parametrów krytycznych pozwala na analizowanie zjawisk termicznych i mechanicznych w oparciu o sprzężenie słabe.

a)



b)



Rys. 1. a) Napęd indukcyjno-dynamiczny (NID) b) schemat blokowy szybkiego wyłącznika hybrydowego

W niniejszym artykule autorzy prezentują wyniki badań dynamiki NID rozumianej, jako parametry kinematyczne, takie jak przyspieszenie i przemieszczenie chwilowe elementu ruchomego (dysku) uzyskane z własnego autorskiego modelu elektromagnetycznego zrealizowanego w środowisku ANSYS-Maxwell. Dynamika napędu składającego się z cewki zasilanej z baterii kondensatorów i sprzężonego z nią dysku zależy od wielu parametrów, ale bardzo istotnym z nich jest początkowa wartość energii naładowanej baterii kondensatorów. Z kolei dzięki rozwojowi kondensatorów wysokonapięciowych obecnie możliwe jest naładowanie takiej baterii do wartości

kilkunastu kV [6]. To z kolei powoduje przepływ prądu cewki o wartości przekraczającej 100 kA. Tak duże wartości prądu cewki pomimo krótkiego czasu trwania ( $t < 1$  ms) mogą spowodować niebezpieczny wzrost temperatury obu elementów, a zwłaszcza cewki ze względu na adiabatyczny charakter nagrzewania. Wysoka temperatura może z jednej strony powodować czasową zmianę rezystywności, co może wpływać na dynamikę napędu, a z drugiej przyspieszać starzenie się izolacji drutu cewki. Z tego powodu pojawia się problem projektowy doboru parametrów napędu NID, które zapewnią z jednej strony uzyskanie oczekiwanej dynamiki (rozumianej jako osiągnięcie odpowiedniego przemieszczenia dysku w określonym czasie) przy jednoczesnym ograniczeniu maksymalnych temperatur cewki i dysku. Dlatego oprócz badań właściwości dynamicznych napędu przeprowadzono badania rozkładów temperatur w cewce i dysku w rozszerzonym modelu elektromagnetyczno-termicznym. Uzyskane wyniki mogą stanowić wskazówkę dla odpowiedniego doboru parametrów NID, w tym dopuszczalnej energii początkowej baterii i związanego z nią przekroju poprzecznego zwojów cewki, a także podziału dysku na warstwy składające się z miedzi i aluminium. Dobór tych parametrów wymaga przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej (nieprezentowanej w tym artykule). Rozważania autorów dotyczące analizy naprężeń w elementach siłownika przedstawiono w [7,8].

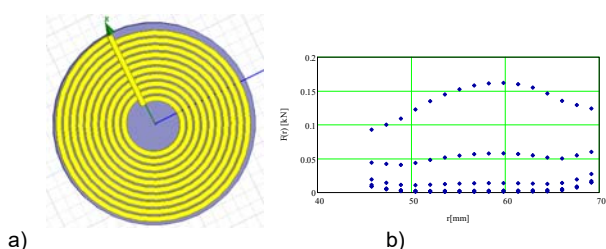
### Model Elektromagnetyczno-Termiczny NID

Model elektromagnetyczno-termiczny został opracowany z użyciem dwóch solverów (podprogramów środowiska ANSYS): elektromagnetycznego *Maxwell*, obecnie stanowiącego element środowiska ANSYS oraz solwera zwanego *Transient Thermal*. Model elektromagnetyczny w solverze *Maxwell* oparty jest na rozwiązaniu ogólnego równania wyznaczającego wektorowy potencjał magnetyczny  $\mathbf{A}$  (1) [2,9]. Prędkość  $\mathbf{v}$  ośrodka ruchomego (dysku) jest wyznaczana na podstawie równania ruchu pod wpływem siły elektrodynamicznej  $\mathbf{F}$  określonej na podstawie ogólnej formuły (2),

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V + \sigma \mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{A} \quad (1)$$

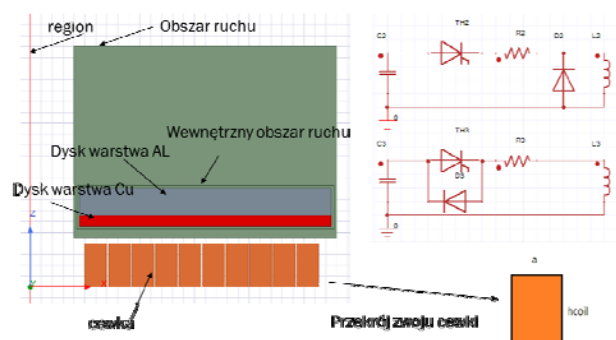
$$\mathbf{F}(t) = \iiint_{V_{disc}} \mathbf{J}(t) \times \mathbf{B}(t) dV_{disc} \quad (2)$$

Ponieważ w pracach innych badaczy [2,10], ale także autorów niniejszego artykułu [9,11], badano wpływ rozkładu ciśnienia magnetycznego na naprężenia powstające w elementach siłownika. Z badań tych wynika, że aby uniknąć nadmiernych naprężeń działających na dysk, uzwojenia cewki powinny być rozłożone na prawie całej powierzchni dysku. Ten rozkład jest również korzystny ze względu na najlepsze sprzężenie z tarczą (rys. 2). Dlatego w prezentowanych badaniach przyjęto stałą szerokość zwojów cewki  $a = 4$  mm (rys. 3).

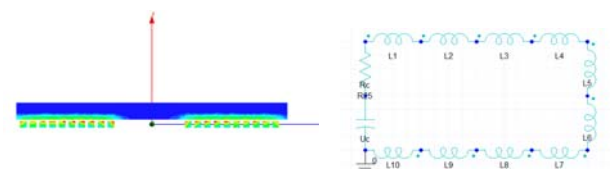


Rys. 2. a) Równomierny rozkład uzwojeń cewki wzdłuż promienia dysku b) rozkład sił działających na wybrane warstwy dysku

W solverze *Maxwell* do zamodelowania cewki można użyć obiektu typu *stranded* lub *solid*. Użycie cewki typu *stranded* zakłada jednakową chwilową gęstość prądu w każdym punkcie przekroju każdego zwoju. Tego typu założenia nie ma cewka zamodelowana, jako *solid* (rys. 3), gdzie każdy zwój jest odrębnym obiektem, ale wszystkie są łączone szeregowo w jedno uzwojenie w obwodzie zewnętrznym, zamodelowanym w nakładce *Maxwell Circuit Editor* (rys. 4). Jednak w przypadku modelowania każdego zwoju cewki w trybie *solid* należy zdawać sobie sprawę z dłuższego czasu symulacji. Stąd autorzy do realizacji badań wykorzystali model 2D, pomimo iż płaska cewka ma kształt spirali. Badania porównawcze pomiędzy modelem 2D i 3D (również zrealizowanym przez autorów) wykazały bardzo dobrą zbieżność. Dzięki podejściu 2D i określeniu obszaru ruchu, model elektromagnetyczny umożliwia przeprowadzenie symulacji z uwzględnieniem przemieszczenia dysku w satysfakcjonującym czasie ( $t < 1$  h). Na rysunku 3 przedstawiono najważniejsze elementy modelu w układzie cylindrycznym (połowa modelu) w tym dwuwarstwowy dysk składający się z warstwy aluminiowej i miedzianej. W trakcie badań symulacyjnych okazało się, że istotny wpływ na wynik symulacji miała wielkość obszaru powietrza, który otacza pozostałe elementy modelu zwany regionem. Należy ustawić ten obszar możliwie duży zdając sobie sprawę z konsekwencji wpływu wielkości regionu na liczbę elementów modelu, a stąd na czas symulacji.



Rys. 3. Model napędu z cewką typu *solid* i odpowiadające jej zewnętrzne jedno i dwukierunkowe obwody zasilania



Rys. 4. Widok całkowity modelu i obwód cewki składającej się z 10 zwojów

Model termiczny zrealizowano w solverze *Transient Thermal* i jest oparty na rozwiązaniu równania przewodnictwa (3).

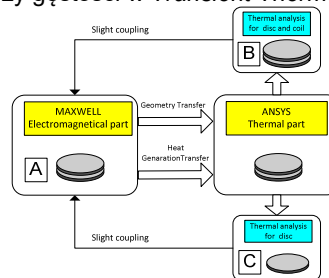
$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + \frac{j^2}{k\sigma} \quad (3)$$

gdzie:  $T$  – zmiany w czasie temperatury ciała stałego,  $\sigma, k$  – odpowiednio przewodnictwo elektryczne i cieplne,  $a$  – dyfuzyjność termiczna,  $j$  – gęstość prądu w ciele stałym.

Próbkę analitycznego rozwiązania równania przewodnictwa dla siłownika o symetrii cylindrycznej podjęli już autorzy [2]. Ponieważ zjawisko jest dynamiczne, w którym prądy przejściowe trwają niespełna kilka milisekund, autorzy w pracy [2] założyli, że nagrzewanie ma charakter adiabatyczny zarówno w cewce jak i dysku. Oznacza to, że

podczas przepływu prądu dominującym zjawiskiem jest nagrzewanie, a składową przewodzenia ciepła w (3) można w tym czasie pominąć, co umożliwia traktowanie równania (3) jako dwóch równań rozpatrywanych w osobnych przedziałach czasu. Ponadto w części elektromagnetycznej autorzy pracy [2] założyli przepływ prądu tylko w warstwie naskórkowej. Powyższych uproszczeń nie musi zakładać model realizowany w solverze *Transient Thermal*, którego połączenie z solverem elektromagnetycznym przedstawia schemat blokowy na rysunku 4. Celem sprawdzenia wpływu konwekcji na nagrzewanie, w modelu dodano blok C (rys.4), gdzie można analizować rozkład temperatury dysku bez obecności cewki (i odwrotnie). Badania potwierdziły przypuszczenia autorów [2], że konwekcja w tym adiabatycznym przypadku nagrzewania nie ma wpływu na otrzymywane wartości temperatur. Analiza termiczna przeprowadzana jest w solverze *Transient Thermal* na podstawie wyników uzyskanych w solverze *Maxwell*. Podczas importu tych danych należy kontrolować tzw. współczynnik transferu (dla każdego kroku czasowego), który powinien być bliski jedności. Wartość tego

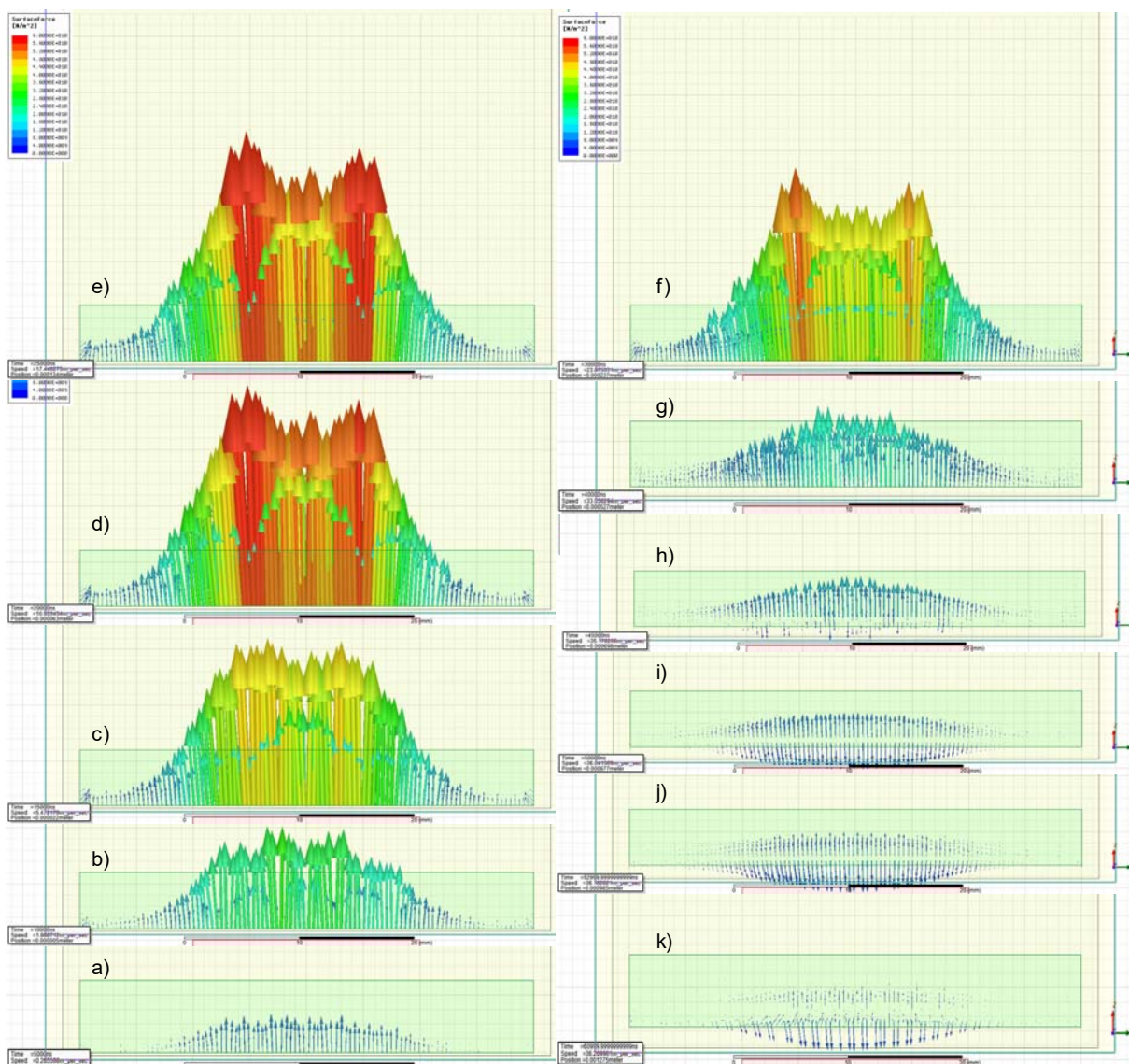
współczynnika jest zależna od stosunku liczby elementów siatki w solverze *Maxwell* do liczby elementów, na które dzielony jest model w *Transient Thermal*. W prowadzonych badaniach największa gęstość siatki w *Maxwell* wyniosła ok 10 tysięcy przy gęstości w *Transient Thermal* ok 100 tys.



Rys. 4. Schemat blokowy magnetyczno-termicznego modelu NID

### Wyniki symulacji dynamiki ruchu dysku

Parametry napędu, które były niezmiennie w trakcie prowadzonych badań symulacyjnych przedstawiono w tabeli 1, a pozostałe umieszczano w podpisach rysunków.



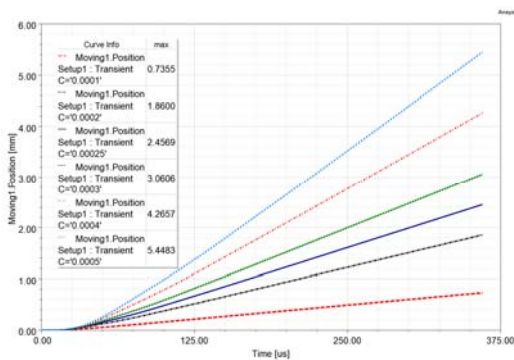
Rys. 5. a) Zrzuty ekranów animacji ruchu i sił działających na każdy element dysku:(a-e) narastanie sił, (f-k) maleńie sił

Tabela 1. Stałe (w procesie badań) parametry napędu

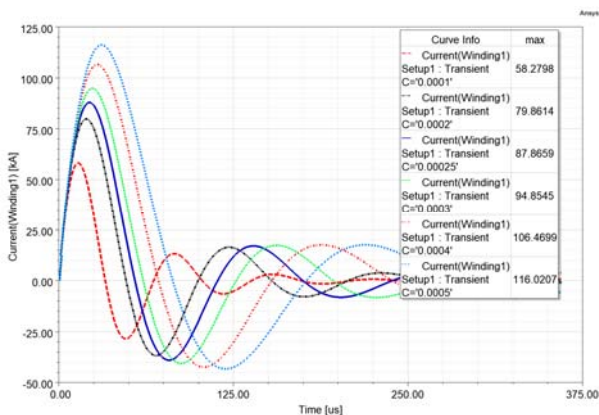
Cewka	Dysk
Liczba zwojów $N = 10$	Promień zew. $R_z = 55$ mm
Promień wew. $r_w = 10$ mm	Promień wew. $R_w = 9$ mm
Szerokość zwoju $a = 4$ mm	Wysokość dysku $h_{CU} + h_{AL} =$
	constans = 7 mm
Grubość izolacji cewki 0,3 mm	masa = 5 kg

Dzięki możliwościom postprocesorów w obecnych polowych programach komercyjnych możliwe jest łatwe tworzenie animacji pokazujących zmiany dowolnych wielkości w czasie. Na rysunku 5 przedstawiono ekrany animacji ruchu dysku wraz z siłami działającymi na poszczególne elementy dysku. Dzięki animacji zaobserwowano, że w trakcie zanikania pierwszego pulsu siły pojawiają się jednak (niewielkie) siły hamujące (rys. 5 i,j,k), oraz że siły radialne mają nieznaczne wartości w porównaniu z siłami osiowymi. Ta ostatnia obserwacja potwierdza założenie, jakie autorzy przyjęli rozwiązując równanie drgań dysku traktowanego jako cienka płyta [7].

W następnym etapie badań z użyciem części elektromagnetycznej modelu zbadano wpływ takich parametrów jak energia początkowa baterii kondensatorów, która zależy od  $U_c$  i  $C$ , oraz wysokości przekroju poprzecznego zwojów cewki  $h_{coil}$  na dynamikę napędu, reprezentowaną przez przebieg siły, a przede wszystkim przemieszczenia elementu ruchomego.

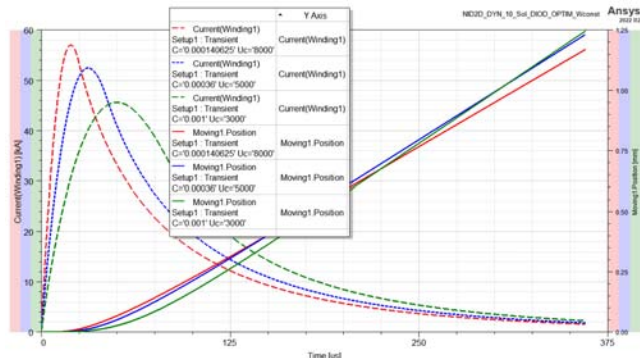


Rys. 6. Rodzina przemieszczeń dysku przy  $U_c = 8$  kV dysk- Al,  $a \times h_{coil} = 4 \times 8$  mm, masa = 5 kg,  $C = \text{variab}$ .



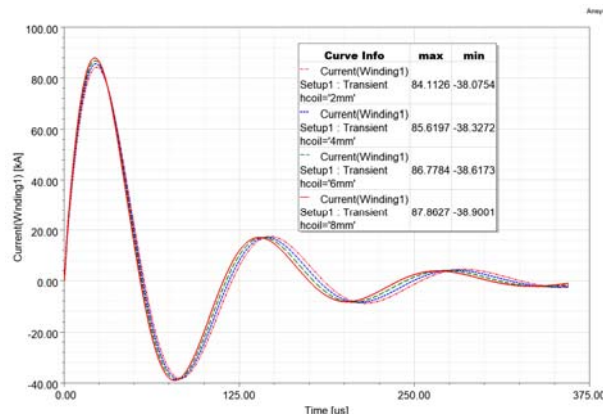
Rys. 7. Rodzina przebiegów prądów cewki przy  $U_c = 8$  kV dysk- Al,  $a \times h_{coil} = 4 \times 8$  mm, masa = 5 kg,  $C = \text{variab}$ .

Zakładając, że dla poprawnej pracy z elementami wyłącznika hybrydowego przewidywaną odległość od cewki (2 mm) dysk powinien osiągnąć przed upływem 0,35 ms, wyznaczona została rodzina przebiegów prądów i przemieszczeń dysku. Na tej podstawie można znaleźć odpowiednią pojemność przy wybranym napięciu początkowym np. 8 kV (lub odwrotnie).

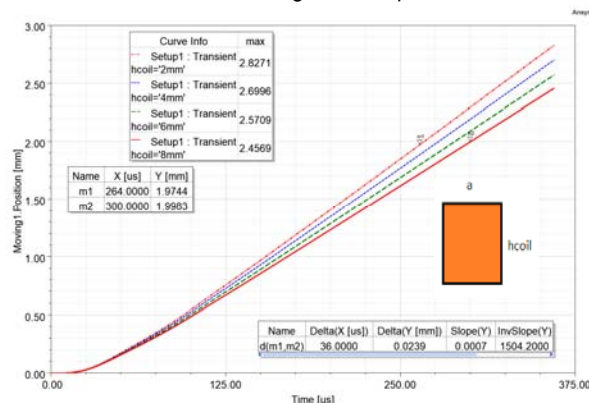


Rys. 8. Rodzina prądów cewki i przemieszczeń dysku (obwód jednokierunkowy) przy  $a \times h_{coil} = 4 \times 8$  mm, dysk- Al, masa = 5 kg,  $C = \text{variab}$ .  $E = C \times U_c^2 / 2 = 4,5$  kJ

Jak widać z rysunku 6 (granatowa linia ciągła), wartość 250  $\mu\text{F}$  (przy  $U_c = 8$  kV) jest minimalną pojemnością do osiągnięcia oczekiwanej odległości 2 mm (dla  $m = 5$  kg). Należy zauważyć, że dla większej pojemności przy niezmiennym napięciu zwiększa się dynamika napędu (określana tutaj przez maksymalne przemieszczenie osiągnięte przez dysk), ale również znacznie wzrasta prąd (rys. 7), co może powodować zbyt wysoką temperaturę cewki. Następne badania przeprowadzono dla parametrów napięć  $U_c$  i pojemności  $C$  przy założeniu stałości początkowej energii baterii  $W_c = 4,5$  kJ dla jednokierunkowego zasilania cewki (rys. 8).



Rys. 9. Rodzina przebiegów prądów cewki przy  $U_c = 8$  kV dysk- Al,  $a \times h_{coil} = 4 \times 8$  mm, masa = 5 kg,  $C = 250$   $\mu\text{F}$ ,  $h_{coil} = \text{variab}$ .

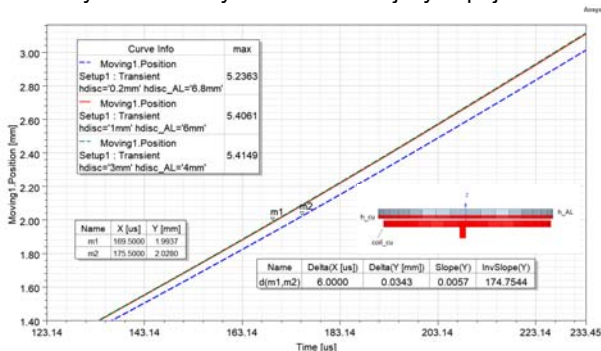


Rys. 10. Rodzina przemieszczeń dysku przy  $U_c = 8$  kV dysk- Al,  $a \times h_{coil} = 4 \times 8$  mm, masa = 5 kg,  $C = 250$   $\mu\text{F}$ ,  $h_{coil} = \text{variab}$ .

Obserwując początek krzywych przemieszczeń widać, że najkrótszy czas odpowiedzi uzyskuje się dla najmniejszej pojemności. Dlatego projektanci siłowników bardzo często wybierają parametry o małej pojemności przy odpowiednio dużym napięciu początkowym. Analogiczne testy przeprowadzono dla dwukierunkowego układu zasilania

cewki uzyskując podobne wnioski. Oczywiście jest, że temperaturę cewki można zmniejszyć, zwiększając przekrój poprzeczny zwojów cewki. Ponieważ, jak wspomniano wcześniej, przyjęto stałą wartość szerokości  $a$  prostokątnych zwojów cewki, dlatego w drugim kroku zbadano wpływ wysokości cewki ( $h_{coil}$ ) na przemieszczenia dysku. Przeprowadzone badania pokazały, że zwiększenie wysokości cewki mimo niewielkich zmian jej prądu (rys. 9) skutkuje zmniejszeniem położenia maksymalnego dysku (rys. 10). Spadek tego maksymalnego przemieszczenia świadczy o pogorszeniu dynamiki napędu, ale z drugiej strony należy pamiętać o zależności temperatury od pola przekroju zwojów cewki.

Czasami projektanci silowników używają dysków dwuwarstwowych, gdzie warstwą znajdującą się bliżej cewki jest dysk miedziany, ponieważ miedź ma wyższą przewodność niż aluminium. Rozwiązanie to wykorzystuje fakt, że pole impulsowe wytwarza prądy wirowe (głównie odpowiedzialne za generowanie siły elektrodynamicznej) w cienkiej warstwie naskórkowej (rys. 4 i rys. 12). Miedź, jako materiał bardziej przewodzący, zmniejsza grubość warstwy naskórkowej, co pozwala na zastosowanie cienkiej warstwy miedzianej zgrzanej (lub sprasowanej) z warstwą aluminiową, mającą z kolei lepsze właściwości wytrzymałościowe. Innym powodem zastosowania miedzianej warstwy dysku jest sytuacja, w której konstrukcja styków, gdzie styk ruchomy stanowi dysk jest wykonana z miedzi. Dlatego przeprowadzono badanie wpływu grubości warstwy miedzi w stosunku do warstwy aluminium na dynamikę NID przy założeniu stałej całkowitej grubości dysku. Badania tym razem przeprowadzono dla dużej energii baterii kondensatorów (32 kJ) dla wyłącznika hybrydowego [3,4] o dużej masie ( $m = 11$  kg) elementów ruchomych. Na rysunku 11 widać, że dla warstw Cu grubszych niż 1 mm różnica przemieszczeń jest niewielka nawet dla baterii kondensatorów o dużej pojemności. Podobny wniosek uzyskano dla mniejszych pojemności.

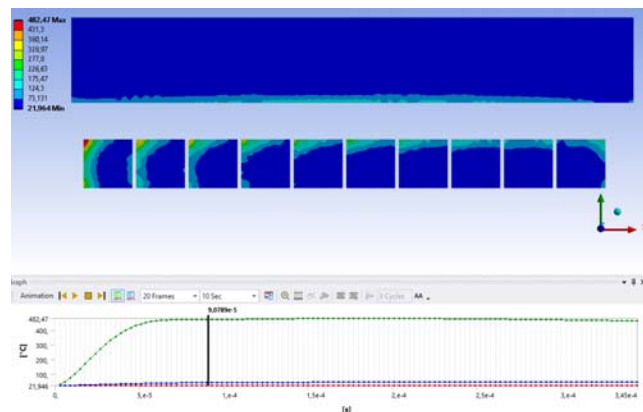


Rys. 11. Przemieszczenie dysku dwuwarstwowego przy  $h_{CU} = \text{variab}$ ,  $h_{CU}+h_{AL} = \text{constans} = 7$  mm  $U_c = 8$  kV,  $C = 1000$   $\mu$ F,  $a \times h_{coil} = 4 \times 8$  mm, masa = 11 kg

### Wyniki analizy termicznej

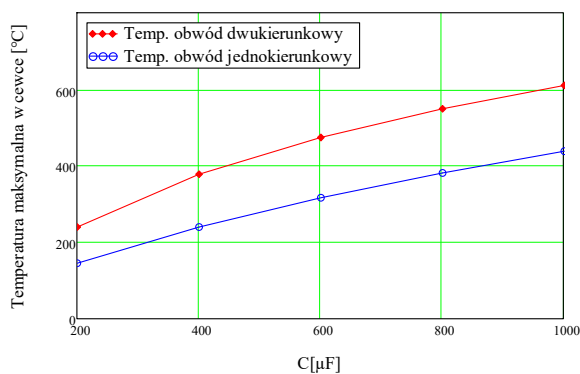
Badania rozkładu temperatur w cewce i dysku przeprowadzono dla dwóch rodzajów obwodów zasilania cewki (jedno i dwukierunkowy). Na głównym ekranie postprocesora solwera *Transient Thermal* można prześledzić (włączając animację) zmiany rozkładu temperatur w przekroju cewki i dysku oraz przebiegi zmiany temperatur: maksymalnej (kolor zielony), średniej (granatowy) i minimalnej (czerwony). Z uzyskanej analizy przedstawionej na rysunku 12 wynika, że w przypadku dysku, wzrost temperatury w tym temperatury maksymalnej lokalizuje się w cienkiej warstwie naskórkowej na powierzchni zwróconej do cewki. Z kolei w przypadku cewki również nagrzewa się powierzchniowo (od strony zwróconej do dysku), ale w przypadku zwojów środkowych także od strony powierzchni bocznej, przy czym maksymalna

temperatura lokalizuje się w najbardziej środkowym zwoju, na jego powierzchni górnej w każdym przeprowadzonym badaniu.



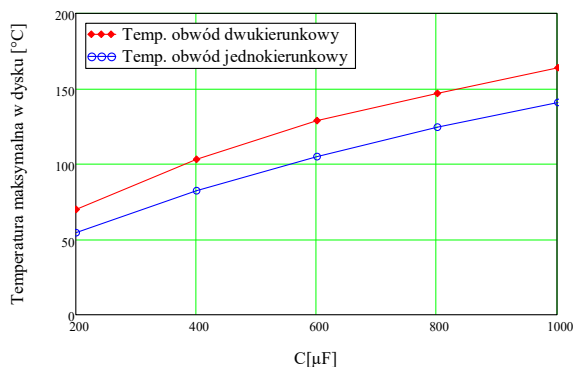
Rys. 12. Rozkłady temperatur w cewce i dysku oraz przebiegi temperatur: maksymalnej (zielony) średniej (granatowy), i minimalnej (czerwony),  $U_c = 8$  kV,  $C = 1000$   $\mu$ F,  $a \times h_{coil} = 4 \times 4$  mm

Ponieważ temperaturę elementów w silowniku można obniżyć zmniejszając energię początkową kondensatora lub zwiększając przekrój zwoju cewki, wyznaczono krzywe temperaturowe cewki i dysku w funkcji pojemności. Przyjęto, że temperatura zwojów cewki (ze względu na zastosowaną izolację) nie powinna przekraczać  $240^{\circ}\text{C}$  w żadnym punkcie swojej powierzchni. Pierwszą symulację przeprowadzono dla cewki o przekroju  $4 \times 8$  mm, dla której, jak widać na rys. 13, dopuszczalna pojemność musiałaby być mniejsza niż  $300$   $\mu$ F (dla dwukierunkowego obwodu zasilania cewki). Należy zauważyć, że dla zasilania jednokierunkowego uzyskano wyraźnie niższe temperatury. Z kolei z rysunku 14 wynika dodatkowo, że wartości maksymalne temperatur w dysku są wyraźnie mniejsze w porównaniu z cewką.

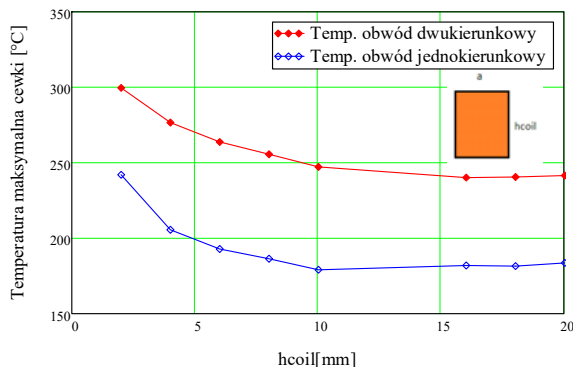


Rys. 13. Temperatura maksymalna w cewce w funkcji pojemności kondensatora dla  $U_c = 8$  kV,  $a \times h_{coil} = 4 \times 8$  mm,  $h_{CU} = 3$  mm,  $h_{AL} = 4$  mm

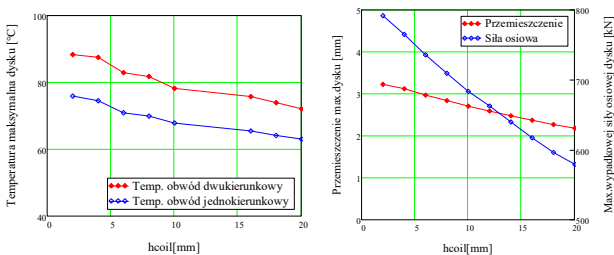
W kolejnym kroku zbadano wpływ wzrostu wysokości cewki ( $h_{coil}$ ) na jej maksymalną temperaturę. Na podstawie uzyskanych wyników (rys. 15) można stwierdzić, że wzrost  $h_{coil}$  do wartości niewiele ponad 10 mm zmniejsza wartość maksymalnej temperatury cewki, zarówno w układzie z diodą (obwód jednokierunkowy), jak i bez niej (obwód dwukierunkowy). Dalsze zwiększanie wysokości cewki miało już niewielki wpływ na obniżenie jej temperatury. Na rysunku 16 przedstawiono charakterystyki maksymalnych wartości temperatur w dysku, dla obu rodzajów zasilania cewki, a także charakterystyki wartości maksymalnych siły i przemieszczenia dysku w funkcji wysokości cewki  $h_{coil}$ , które są prawie identyczne niezależnie od rodzaju zasilania cewki.



Rys. 14. Temperatura maksymalna w dysku w funkcji pojemności kondensatora dla  $U_c = 8 \text{ kV}$   $a \times h_{coil} = 4 \times 8 \text{ mm}$ ,  $h_{CU} = 3 \text{ mm}$   $h_{AL} = 4 \text{ mm}$



Rys. 15. Temperatura maksymalna w cewce w funkcji wysokości cewki  $h_{coil}$  dla  $U_c = 5 \text{ kV}$   $a = 4 \text{ mm}$ ,  $h_{CU} = 3 \text{ mm}$ ,  $h_{AL} = 4 \text{ mm}$ ,  $C = 1000 \text{ µF}$



Rys. 16. Charakterystyki maksymalnych temperatur, przemieszczeń i wypadkowej siły osiowej działającej na dysk w funkcji  $h_{coil}$ ,  $U_c = 5 \text{ kV}$ ,  $C = 1000 \text{ µF}$ ,  $a \times h_{coil} = 4 \times 8 \text{ mm}$ ,  $h_{CU} = 3 \text{ mm}$ ,  $h_{AL} = 4 \text{ mm}$

## Podsumowanie

Obecnie przy dużych energiach kondensatorów możliwe jest znaczne nagrzanie elementów napędu nawet w czasie krótszym niż 1 ms. Dlatego przy projektowaniu siłownika konieczne jest przeprowadzenie analizy termicznej. Na podstawie przeprowadzonych badań można wyznaczyć parametry graniczne siłownika, przy których z jednej strony zostaną osiągnięte oczekiwane wartości kinematyczne (oczekiwane przemieszczenie dysku w określonym czasie). W prezentowanych badaniach przy zadanych z góry niektórych parametrach (tab. 1) wyznaczono pojemność  $250 \text{ µF}$  (przy przekroju zwoju  $a \times h_{coil} = 4 \times 8 \text{ mm}$ ), dla której temperatura cewki nie przekracza wartości dopuszczalnej. Większą pojemność baterii można zastosować przy obniżonym napięciu lub przy zastosowaniu jednokierunkowego obwodu zasilania cewki. Choć temperatura cewki ze względu na trwałość izolacji jest ważniejsza niż temperatura dysku, należy pamiętać, że wzrost temperatury wpływa na wzrost rezystywności metali, co z jednej strony może osłabić dynamikę napędu jak

również założenie o słabym sprzężeniu przyjętym w modelu. Jednak badania autorów w [12] wykazały, że jeśli temperatura dysku i cewki nie przekracza  $300^\circ\text{C}$  to wpływ wzrostu rezystancji na dynamikę napędu jest znikomy, jeżeli układ nie jest stosowany w układach SPZ (samoczynnego ponownego załączania). Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że maksymalne przemieszczenie uzyskiwane przez ruchomy dysk maleje wraz ze wzrostem wysokości  $h_{coil}$  przekroju poprzecznego zwoju cewki, co należy uwzględnić przy zwiększaniu w ten sposób powierzchni przekroju dla zmniejszenia temperatury maksymalnej cewki. Oczywiście pełny projekt elementów siłownika musi być uzupełniony o analizę naprężeń [7,8].

**Autorzy:** dr hab. inż. Piotr Jankowski Prof. UMG, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej E-mail: p.jankowski@we.umg.edu.pl; dr inż. Damian Hallmann, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej E-mail: d.hallmann@we.umg.edu.pl.

## LITERATURA

- [1] Peng C., Husain I., Huang A., Evaluation of Design Variables in Thompson Coil based Operating Mechanisms for Ultra-Fast Opening in Hybrid AC and DC Circuit Breakers, *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, (2015), 2325-2332
- [2] Basu S., Srivastava K.D., Analysis of A Fast Acting Circuit Breaker mechanism Part II: Thermal and Mechanical Aspects, *Transaction Power Apparatus and Systems*, 3 (1972), 1203-1211
- [3] Rodak M., Borkowski P., Magnetic field analysis of the Inductive Dynamic Drive, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), No 4, 47-50
- [4] Borkowski P., Bartosik M., Rodak M., Sienicki A., Wójcik F., Panev B., Rodriguez-Mateos F., Siemko A., Ultra-Fast, Redundant and Unpolarized DC Energy Extraction Systems for the Protection of Superconducting Magnet Circuits, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69.10 (2021), 9895-9904
- [5] Bartosik M., Borkowski P., Wójcik F., Ultra-Fast Hybrid Systems USH for Protecting Direct Current Circuits With High Magnetic Energy, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, Vol. 69.2 (2021)
- [6] Nowak, M.; Jakubiuk, K.; Kowalak, D.; Pikoń, M.; Czucha, J.; Jankowski, P., Compact and Integrated High-Power Pulse Generation and Forming System, *Energies*, 15.1 (2022), 1-23
- [7] Jankowski P., Mindykowski J., Wołoszyn M., Effect of Power frequency on the stress state of disc actuator, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 45.1-4 (2014), 639-647
- [8] Jankowski P., Wołoszyn M., Comparison of properties of the new electro-mechanical model and circumferential model of the inductive-dynamic drive, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 59.2 (2019): 483-494
- [9] Jankowski P., Analytic-numerical approach in modelling electrodynamic phenomena of inductive dynamic drive, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 39.1 (2016), 79-86
- [10] Hyun-Moa A., Jong-Deoka L., Byuk-Jinb L., Sung-China H., Optimal design of permanent magnet actuator for vacuum circuit breakers using response surface methodology, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 45 (2014), No. 1-4, 503-509
- [11] Jankowski P., Mindykowski J., Measurement of quantities characterizing the properties of an inductive dynamic drive. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), 78-82
- [12] Jankowski P., Wołoszyn M., Study of the effect of adiabatic heating on the operation of the electrodynamic actuator, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 59 (2019), No. 2, 495-504