Charakterystyki statyczne i dynamiczne siły elektromagnetycznej generowanej przez elastyczne kompozyty NdFeB w aktywnie sterowanym polu magnetycznym

Maciej Gierałtowski

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny

e-mail: 86277@student.pb.edu.pl

Arkadiusz Mystkowski

Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny

e-mail: a.mystkowski@pb.edu.pl

Joanna Mystkowska

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny

e-mail: j.mystkowska@pb.edu.pl

DOI: 10.65731/az-2026-0038

Streszczenie

Celem artykułu jest ocena parametrów magnetycznych, w tym generowanej siły elektromagnetycznej przez elastyczne kompozyty magnetyczne na osnowie elastomeru silikonowego Ecoflex 30 z dodatkiem napełniacza NdFeB. Badaniom poddano dwa warianty materiałowe różniące się udziałem masowym mikroproszku: NdFeB 50%mas. oraz NdFeB 70% mas. Dla każdego wariantu wykonano po 6 próbek. Charakterystykę statyczną i dynamiczną siły elektromagnetycznej oceniono na podstawie maksymalnej wartości indukcji magnetycznej B_{max}, wyznaczonej w dwóch prostopadłych układach pomiarowych. Następnie analizowano siłę elektromagnetyczną jako siłę nacisku generowaną przez próbkę w układzie: elektromagnes–próbka, za pomocą rezystancyjnego czujnika FSR (ang. *Force-Sensitive Resistor*). Zastosowano konfigurację magnetyczną (elektromagnes-próbka) w układzie odpychającym, a sygnał z czujnika FSR rejestrowano dla różnych wartości statycznych napięcia elektrycznego zasilającego elektromagnes oraz przy wymuszeniu sygnałem prostokątnym. W analizie

zastosowano podstawowe miary statystyki opisowej, w tym średnią arytmetyczną, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności. Wyniki wykazały, że zwiększenie udziału NdFeB z 50% mas. do 70% mas. powoduje wzrost wartości B_{max}, a tym samym wzrost siły nacisku generowanej w układzie kontaktowym elektromagnes-próbka. Jednocześnie próbka NdFeB 70% mas. charakteryzowała się dłuższym czasem narastania siły elektromagnetycznej. Otrzymane wyniki wskazują, że udział procentowy NdFeB w próbce wpływa zarówno na intensywność odpowiedzi, jak i na dynamikę pracy kompozytu.

Słowa kluczowe

kompozyt magnetyczny NdFeB, materiał elastyczny, siła elektromagnetyczna, pole magnetyczne

Wstęp

Elastyczne kompozyty magnetyczne stanowią grupę materiałów funkcjonalnych, których właściwości mogą być modyfikowane pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Materiały te są najczęściej zbudowane z podatnej osnowy polimerowej oraz rozproszonej fazy magnetycznej. Dzięki takiej budowie możliwe jest połączenie elastyczności typowej dla materiałów miękkich z możliwością zdalnego sterowania odpowiedzią elektromechaniczną.

Potencjalnym obszarem zastosowania tego typu materiałów są układy aktywnej kompresji, w których wymagane jest generowanie kontrolowanego nacisku. W takim przypadku materiał powinien nie tylko uzyskiwać odpowiednią wartość siły kontaktowej, ale również reagować w sposób powtarzalny i sterowalny. Ocena takich właściwości wymaga zastosowania metod statystycznych, które pozwalają porównać wartości średnie, rozrzut wyników oraz stabilność odpowiedzi próbek.

Celem artykułu jest statystyczna ocena odpowiedzi magnetycznej oraz nacisku generowanego przez elastyczne kompozyty Ecoflex 30 z napełniaczem NdFeB. Analizie poddano dwa warianty materiałowe z wypełnieniem NdFeB odpowiednio 50% mas. i 70% mas. Oceniono maksymalną wartość indukcji magnetycznej oraz zależność siły elektromagnetycznej mierzonej za pomocą czujnika siły nacisku w funkcji napięcia elektrycznego elektromagnesu. Przeprowadzono badania charakterystyki statycznej i dynamicznej.

1. Przegląd literatury

Aktywne elastomery magnetycznie są materiałami kompozytowymi, w których cząstki magnetyczne rozmieszczone są w elastycznej osnowie polimerowej. Pod

wpływem zewnętrznego pola magnetycznego cząstki te mogą oddziaływać ze sobą, powodując zmianę właściwości elektromechanicznych materiału. W zależności od składu i mikrostruktury może to prowadzić do zmiany sztywności, tłumienia, odkształcenia lub siły kontaktowej [Boczkowska i Awietjan, 2012, s. 147–180; Dargahi i in., 2019, s. 269–283].

W literaturze wskazuje się, że jednym z kluczowych czynników wpływających na właściwości kompozytów magnetycznych jest udział fazy magnetycznej. Zwiększenie zawartości cząstek może wzmacniać odpowiedź elektromagnetyczną materiału na zewnętrzne pole magnetyczne, ale jednocześnie wpływać na właściwości mechaniczne osnowy, w tym sztywność i odpowiedź lepkosprężystą [Boczkowska i Awietjan, 2012, s. 147–180; Böse, 2007, s. 4790–4797; Jolly i in., 1996, s. 607]. Oznacza to, że projektowanie tego typu materiałów wymaga uwzględnienia zarówno parametrów magnetycznych, jak i mechanicznych.

Szczególne znaczenie mają elastomery magnetoreologiczne i magnetycznie aktywne, które mogą wykazywać zmianę sztywności, odkształcenia lub siły kontaktowej pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego [Dargahi i in., 2019, s. 269–283; Böse i in., 2021, s. 1550–1564]. Właściwości takich kompozytów zależą m.in. od rodzaju matrycy, rodzaju napełniacza, udziału fazy magnetycznej, rozmieszczenia cząstek oraz sposobu wytwarzania próbek [Jolly i in., 1996, s. 607; Bira i in., 2020].

Elastomery magnetyczne są badane m.in. w kontekście miękkiej robotyki, aktuatorów, sensorów oraz rozwiązań biomedycznych [Bira i in., 2020; Böse i in., 2021, s. 1550–1564]. W zastosowaniach istotne znaczenie ma możliwość kontrolowanego generowania siły nacisku przez te materiały. Materiał powinien być podatny, powtarzalny w odpowiedzi na statyczne i dynamiczne natężenie zewnętrznego pola magnetycznego. Oprócz wartości odpowiedzi statycznej i dynamicznej ważna jest również analiza statystyczna pomiarów.

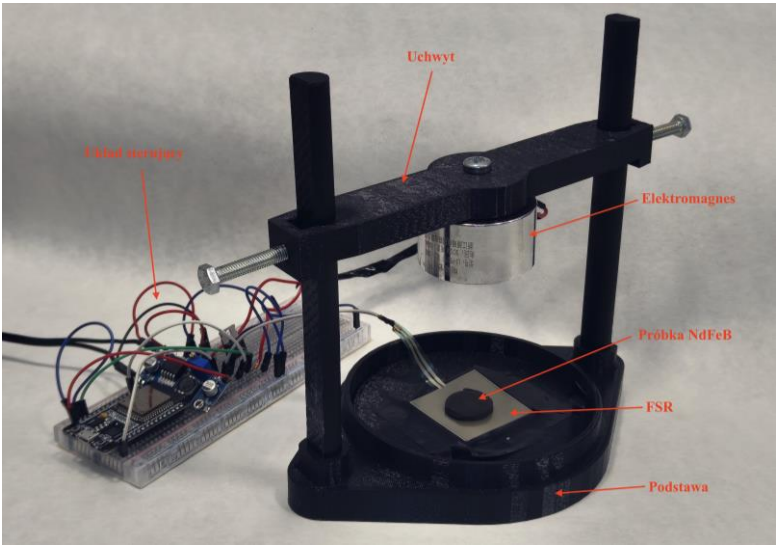
2. Metodyka badań

Badaniom poddano elastyczne kompozyty magnetyczne wykonane na osnowie elastomeru silikonowego Ecoflex 30 z dodatkiem mikroproszku NdFeB. Materiał NdFeB to stop neodym–żelazo–bor, który po namagnesowaniu jest zdolny do utrzymywania stałej wartości indukcji magnetycznej po usunięciu pola magnesującego. Właściwość ta pozwala na oddziaływanie próbki materiału w zewnętrznie sterowanym polu magnetycznym generowanym przez elektromagnes. W układzie elektromagnes–próbka, w konfiguracji odpychającej biegunów N-S S-N, następuje ich wzajemne oddziaływanie w postaci siły nacisku na podłoże.

Wykonano dwa warianty materiałowe: Ecoflex 30 + NdFeB 50% mas. oraz Ecoflex 30 + NdFeB 70% mas. Dla każdego wariantu przygotowano po 6 próbek. Próbki zostały namagnesowane. Zastosowanie dwóch poziomów napełnienia pozwoliło ocenić, czy zwiększenie ilości fazy magnetycznej wpływa na wartość indukcji magnetycznej oraz na siłę nacisku generowanego w obecności zewnętrznego pola elektromagnetycznego.

Próbki wykonano w postaci płaskich krążków o średnicy Ø20 mm i grubości około 2 mm. Przyjęta geometria umożliwiała prowadzenie pomiarów natężenia pola elektromagnetycznego za pomocą sondy teslomierza (gausomierza) wzdłuż zdefiniowanych profili pomiarowych oraz stabilne ułożenie próbki na czujniku FSR podczas badań siły nacisku. Odpowiedź magnetyczną próbek oceniono metodą mapowania rozkładu pola magnetycznego na ich powierzchni. Wartości indukcji magnetycznej rejestrowano w jednostkach mT. Dla każdej próbki wykonano pomiary w dwóch prostopadłych konfiguracjach (profilach), oznaczonych jako d1 i d2. Profile prowadzono przez centralną część próbki, co pozwalało ograniczyć wpływ efektów brzegowych i porównać rozkład pola w dwóch kierunkach. Jako główny parametr opisujący odpowiedź magnetyczną przyjęto maksymalną wartość indukcji magnetycznej B_{max}.

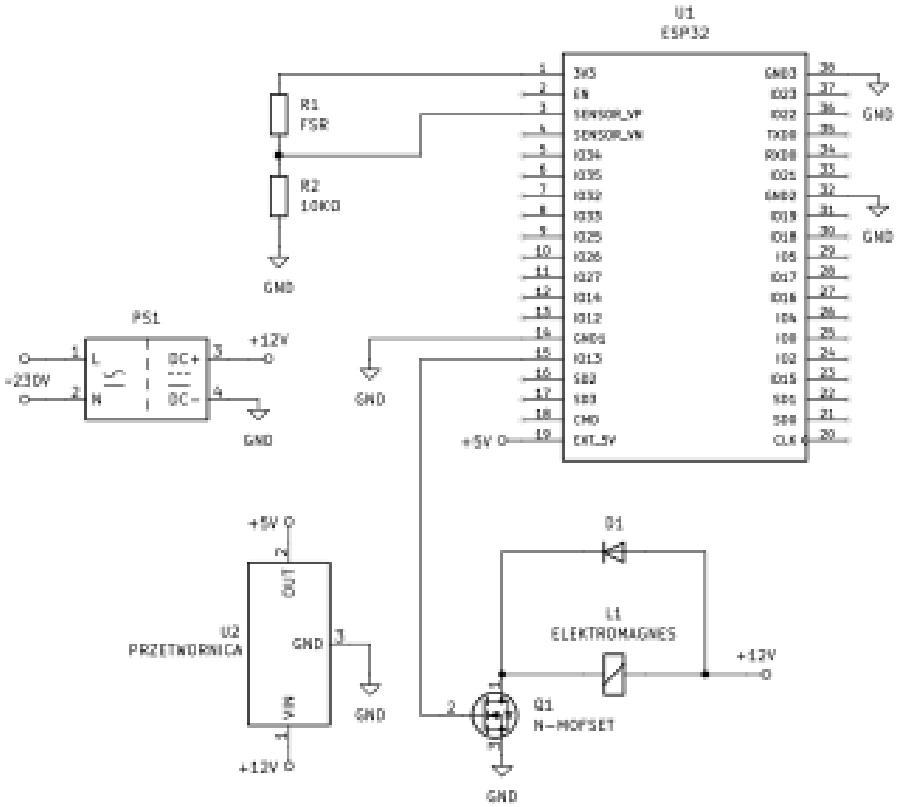
Drugim etapem badań była ocena siły nacisku generowanej przez próbki w obecności zewnętrznego pola elektromagnetycznego. Pomiary wykonano na stanowisku przedstawionym na rys. 1. Próbkę kompozytową Ecoflex/NdFeB umieszczano pomiędzy elektromagnesem a czujnikiem FSR, tak aby możliwe było zarejestrowanie zmiany siły nacisku wywołanej oddziaływaniem próbki z polem elektromagnetycznym. W trakcie pomiaru zachowywano szczelinę powietrzną pomiędzy powierzchnią elektromagnesu a próbką, której wartość wynosiła 2 mm. Przyjęta konfiguracja umożliwiała ocenę odpowiedzi próbki w warunkach kontaktu z czujnikiem nacisku.



Rys. 1. Stanowisko do pomiaru siły nacisku generowanej przez próbkę NdFeB w polu elektromagnetycznym

Źródło: opracowanie własne.

Sterowanie elektromagnesem oraz rejestrację sygnału z czujnika FSR realizowano za pomocą mikrokontrolera ESP32. Schemat połączeń elektrycznych układu pomiarowo-sterującego przedstawiono na rys. 2. Mikrokontroler generował sygnał PWM, który sterował bramką tranzystora MOSFET pracującego jako klucz niskostronny. Elektromagnes był zasilany z osobnego zasilacza 12 VDC, natomiast masa zasilacza i masa ESP32 były wspólne. W obwodzie elektromagnesu zastosowano diodę zaporową, ograniczającą przepięcie indukowane przy wyłączaniu cewki. Sygnał z czujnika FSR był odczytywany przez wejście ADC mikrokontrolera w układzie dzielnika napięcia.



Rys. 2. Schemat połączeń elektrycznych układu pomiarowo-sterującego

Źródło: opracowanie własne.

Podstawowe elementy elektroniczne zastosowane w układzie pomiarowo-sterującym zestawiono w tab. 1. Układ został podzielony na część sterującą, obejmującą mikrokontroler ESP32, komunikację i akwizycję danych, oraz część wykonawczą, odpowiedzialną za zasilanie i przełączanie elektromagnesu. Elektromagnes nie był zasilany bezpośrednio z wyprowadzenia mikrokontrolera, lecz przez oddzielny tor wykonawczy z tranzystorem MOSFET.

Tab. 1. Parametry najważniejszych elementów elektronicznych stanowiska badawczego

Element	Model / typ	Najważniejsze parametry	Funkcja w układzie
Mikrokontroler	ESP32	logika 3,3 V; wyjście PWM; wejście ADC; Wi-Fi	sterowanie elektromagnesem i akwizycja sygnału FSR
Elektromagnes	Elektromagnes koncentryczny	napięcie 12 VDC; moc 6 W; prąd ok. 0,5 A; udźwig 55 kgf	źródło pola elektromagnetycznego
Czujnik nacisku	FSR	czujnik rezystancyjny; sygnał analogowy	pomiar zmiany siły nacisku
Tranzystor wykonawczy	MOSFET logic-level, kanał N	sterowanie bramki 3,3 V; praca jako klucz niskostronny	przełączanie prądu elektromagnesu sygnałem PWM
Zasilacz	Zasilacz VDC	napięcie 12 VDC, moc 12 W	zasilanie toru wykonawczego

Źródło: opracowanie własne.

W badaniach przeprowadzono dwa typy pomiarów siły nacisku. Pierwszym były pomiary odpowiedzi statycznej, w których oceniano zmianę siły nacisku przy zadanym poziomie wysterowania elektromagnesu. Drugim były pomiary odpowiedzi dynamicznej, w których analizowano zachowanie próbki przy wymuszeniu sygnałem prostokątnym. W badaniach dynamicznych oceniano amplitudę odpowiedzi, czas narastania oraz czas opadania sygnału.

Obróbka statystyczna wyników badań była przeprowadzona wykorzystaniem oprogramowania Statistica. Analiza obejmowała ocenę odpowiedzi siły elektromagnetycznej oraz siły nacisku generowanego przez próbki. Dla każdej serii pomiarowej wyznaczono:

- średnią arytmetyczną,
- odchylenie standardowe,
- współczynnik zmienności,
- wybrane parametry odpowiedzi dynamicznej.

W tabelach zastosowano skrótowy zapis parametrów:

- B_{max} — maksymalna indukcja magnetyczna,
- SD — odchylenie standardowe,

- CV — współczynnik zmienności,
- F — siła nacisku,
- A — amplituda odpowiedzi,
- t_r — czas narastania,
- t_f — czas opadania,
- D — współczynnik wypełnienia PWM,
- U_{amp} — amplituda napięcia,
- $U_{śr}$ — średnie napięcie,
- $I_{śr}$ — średni prąd.

W przypadku mapowania pola magnetycznego analizowano wartości B_{max} w profilach d1 i d2. W przypadku siły nacisku analizowano średnią jej wartość przy poziomach sygnału sterującego *PWM* równych 20%, 40%, 60%, 80% i 100%. Dla wymuszenia prostokątnego elektromagnesu oceniono amplitudę odpowiedzi, czas narastania oraz czas opadania generowanej siły w układzie elektromagnes-próbka.

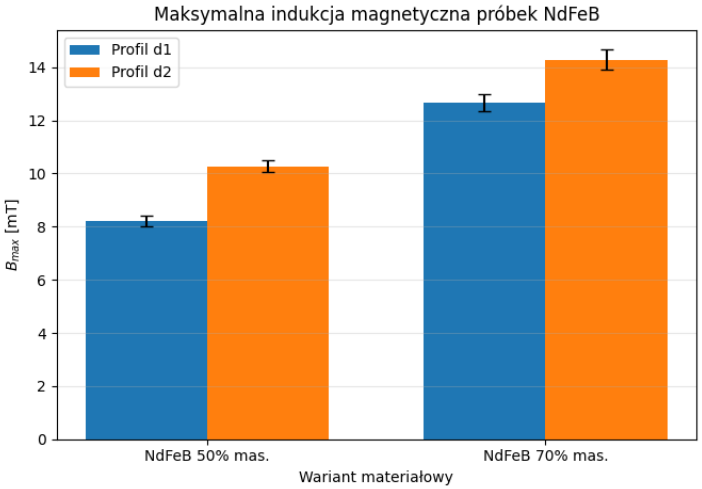
3. Wyniki badań

W pierwszym etapie porównano maksymalne wartości indukcji magnetycznej B_{max} dla próbek NdFeB 50% mas. i NdFeB 70% mas. Wyniki zestawiono w tab. 2 oraz przedstawiono na rys. 3.

Tab. 2. Statystyki opisowe maksymalnej indukcji magnetycznej B_{max}, odchylenia standardowego SD i współczynnika zmienności CV, dla próbek NdFeB

Próbka	**n**	B_{max} **d1 [mT]**	***SD* d1 [mT]**	***CV* d1 [%]**	B_{max} **d2 [mT]**	***SD* d2 [mT]**	***CV* d2 [%]**
NdFeB 50% mas.	6	8,214	0,184	2,228	10,273	0,231	2,249
NdFeB 70% mas.	6	12,658	0,312	2,465	14,287	0,379	2,653

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3. Maksymalna wartość indukcji magnetycznej B_{max} dla próbek NdFeB w profilach d1 i d2

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z wyników przedstawionych na rys. 3, zwiększenie udziału NdFeB z 50% mas. do 70% mas. spowodowało wzrost wartości B_{max} w obu analizowanych profilach. W profilu d1 średnia wartość B_{max} wzrosła z 8,214 mT do 12,658 mT, co odpowiada wzrostowi o około 54%. W profilu d2 wartość B_{max} wzrosła z 10,273 mT do 14,287 mT, czyli o około 39%. Jednocześnie wartości odchylenia standardowego były niewielkie w stosunku do wartości średnich. Dla próbki NdFeB 50% mas. *SD* wyniosło 0,183 mT w profilu d1 oraz 0,231 mT w profilu d2, natomiast dla próbki NdFeB 70% mas. odpowiednio 0,312 mT i 0,379 mT. Współczynniki zmienności nie przekraczały 2,660%, co wskazuje na niewielki względny rozrzut wyników i dobrą powtarzalność pomiarów pola magnetycznego. Wartości B_{max} były wyższe w profilu d2 niż w profilu d1 dla obu wariantów materiałowych. Różnica ta może wynikać z lokalnego rozmieszczenia cząstek NdFeB w osnowie elastomerowej, kierunkowości namagnesowania lub niewielkich różnic w prowadzeniu sondy pomiarowej. Współczynniki zmienności mieściły się w zakresie 2,19–2,66%, co wskazuje na niski względny rozrzut wyników i dobrą powtarzalność pomiarów.

Kolejnym etapem badań był pomiar siły nacisku generowanej przez próbki przy różnych poziomach wysterowania elektromagnesu za pomocą rezystancyjnego czujnika FSR. W badaniach wykorzystano elektromagnes trzymający o napięciu znamionowym 12 V, mocy 6 W i maksymalnym poborze prądu około 500 mA. Elektromagnes nie był zasilany bezpośrednio z wyprowadzenia mikrokontrolera ESP32.

Mikrokontroler pełnił funkcję układu sterującego i generował sygnał PWM, natomiast za przełączanie prądu w obwodzie elektromagnesu odpowiadał oddzielny tor wykonawczy z tranzystorem MOSFET. Takie rozwiązanie było konieczne ze względu na większy pobór prądu przez elektromagnes w stosunku do dopuszczalnej obciążalności wyjść mikrokontrolera. Zastosowanie tranzystora MOSFET umożliwiło bezpieczne sterowanie elektromagnesem z poziomu sygnału logicznego ESP32 oraz regulację wartości średniej zasilania elektromagnesu przez zmianę wypełnienia PWM. Elektromagnes był sterowany sygnałem PWM generowanym przez mikrokontroler ESP32. Amplituda napięcia zasilającego elektromagnes wynosiła max. 12 V, natomiast maksymalny prąd przy wysterowaniu 100% PWM wynosił około 0,5 A. Przy niższych poziomach *PWM* zmieniały się wartości średnie napięcia i prądu doprowadzanego do elektromagnesu. Wartości te określono zgodnie z zależnościami:

$$U_{śr} = D \cdot U \quad (1)$$

$$I_{śr} = D \cdot I_{max} \quad (2)$$

gdzie:
$U_{śr}$ - średnia wartość napięcia zasilającego elektromagnes, $I_{śr}$ - średnia wartość prądu elektromagnesu, D - współczynnik wypełnienia sygnału PWM, U - napięcie zasilania równe 12 V, I_{max} - prąd przy 100% PWM, równy około 0,5 A.

Parametry sterowania *PWM* elektromagnesem przedstawiono w tab. 3. Wyniki pomiarów siły nacisku zestawiono w tab. 4 oraz przedstawiono na rys. 4.

Tab. 3. Parametry elektryczne sterowania elektromagnesem

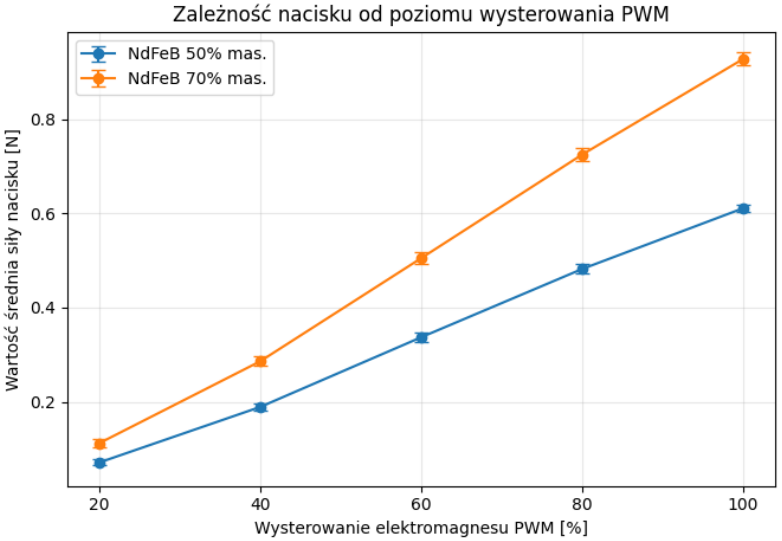
PWM [%]	**D**	U_{amp} **[V]**	$U_{śr}$ **[V]**	$I_{śr}$ **[A]**
20	0,2	12	2,4	0,1
40	0,4	12	4,8	0,2
60	0,6	12	7,2	0,3
80	0,8	12	9,6	0,4
100	1	12	12	0,5

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 4. Średnia wartość siły nacisku generowanego przez próbki NdFeB przy różnych poziomach wysterowania PWM elektromagnesu oraz odchylenie standardowe SD

PWM **[%]**	***F*** **NdFeB 50% mas.** **[N]**	***SD*** **[N]**	***F*** **NdFeB 70% mas.** **[N]**	***SD*** **[N]**
20	0,071	0,006	0,112	0,008
40	0,189	0,007	0,286	0,010
60	0,337	0,009	0,505	0,012
80	0,482	0,010	0,725	0,013
100	0,611	0,008	0,928	0,014

Źródło: opracowanie własne.



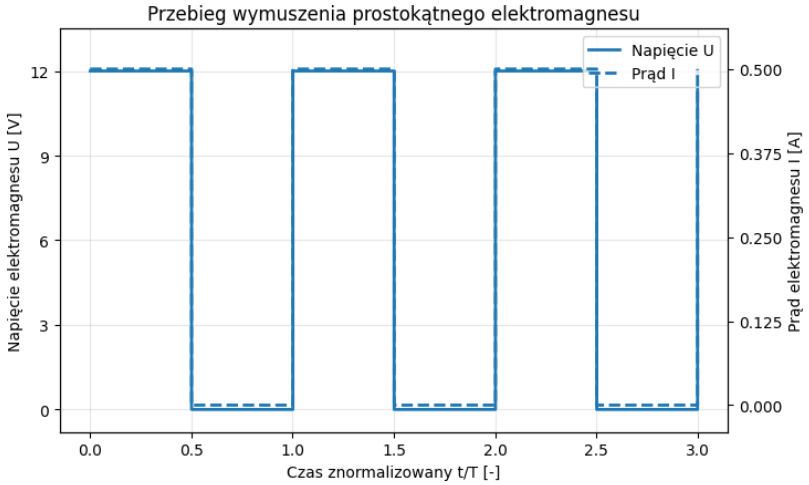
Rys. 4. Zależność wartości średniej siły nacisku w funkcji poziomu wysterowania PWM elektromagnesu dla próbek NdFeB 50% mas. i NdFeB 70% mas.

Źródło: opracowanie własne.

W obu wariantach materiałowych zaobserwowano wzrost siły nacisku wraz ze wzrostem poziomu PWM. Dla próbki NdFeB 50% mas. siła nacisku wzrosła z 0,071

N przy 20% PWM do 0,611 N przy 100% PWM. Dla próbki NdFeB 70% mas. wartości te wyniosły odpowiednio: 0,112 N i 0,928 N. Próbka NdFeB 70% mas. generowała wyższą siłę nacisku w całym zakresie wysterowania. Różnica pomiędzy próbkami wzrosła z 0,041 N przy 20% PWM do 0,317 N przy 100% PWM. Oznacza to, że większy udział fazy magnetycznej NdFeB zwiększa nie tylko maksymalną wartość siły nacisku, ale także prędkość odpowiedzi dynamicznej siły nacisku w funkcji zmiany sygnału sterującego. Zależność siły nacisku w funkcji sygnału PWM jest nieliniowa. Na odpowiedź układu wpływają nieliniowe właściwości elektromagnetyczne elektromagnesu, właściwości elastomerowego kompozytu oraz charakterystyka czujnika FSR. Odchylenia standardowe dla pomiarów nacisku były niskie i mieściły się w zakresie od 0,006 N do 0,014 N. Największe SD odnotowano dla próbki NdFeB 70% mas. przy 100% PWM i wyniosło ono 0,014 N, co przy średniej wartości nacisku 0,928 N wskazuje na stabilną odpowiedź układu. Dla próbki NdFeB 50% mas. przy 100% PWM SD wyniosło 0,008 N przy średnim nacisku 0,611 N.

Kolejnym etapem pomiarów była analiza charakterystyki dynamicznej siły nacisku generowanej przez próbkę przy wymuszeniu sygnałem prostokątnym. W badaniach zastosowano wymuszenie prostokątne typu włącz/wyłącz, odpowiadające przełączaniu elektromagnesu pomiędzy stanem nieaktywnym a pełnym wysterowaniem. Przebieg wymuszenia prostokątnego przedstawiono na rys. 5. W stanie niskim sygnału elektromagnes był wyłączony, dlatego napięcie i prąd przyjmowały wartości zbliżone do 0. W stanie wysokim sygnału elektromagnes był zasilany napięciem 12 V, a prąd osiągał wartość około 0,5 A. Zmiana stanu sygnału powodowała skokową zmianę pola elektromagnetycznego, a w konsekwencji zmianę siły nacisku rejestrowanej przez czujnik FSR.



Rys. 5. Przebieg wymuszenia prostokątnego elektromagnesu w funkcji czasu

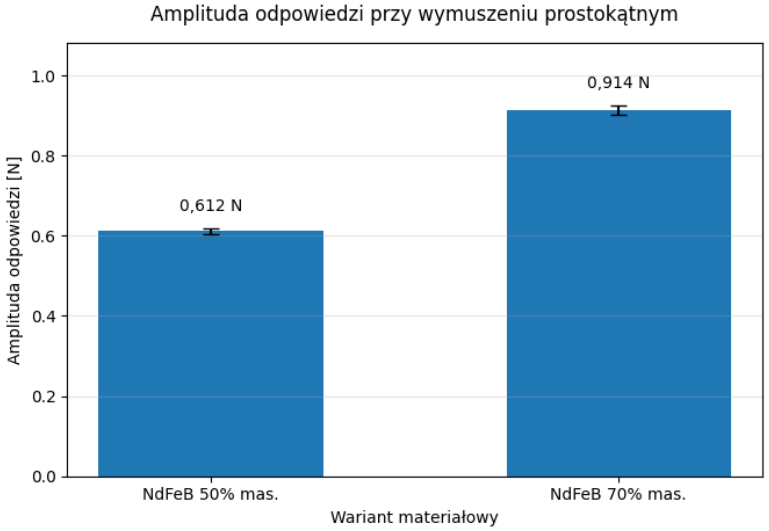
Źródło: opracowanie własne.

W badaniach uwzględniono amplitudę odpowiedzi, czas narastania oraz czas opadania. Wyniki zestawiono w tab. 5 oraz przedstawiono na rys. 6.

Tab. 5. Parametry odpowiedzi dynamicznej przy wymuszeniu prostokątnym

Próbka	***A* [N]**	***SD* [N]**	t_r **[s]**	t_f **[s]**
NdFeB 50% mas.	0,612	0,007	0,321	0,256
NdFeB 70% mas.	0,914	0,011	0,515	0,295

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6. Amplituda odpowiedzi siły nacisku przy wymuszeniu prostokątnym dla próbek NdFeB 50% mas. i NdFeB 70% mas

Źródło: opracowanie własne.

Próbka NdFeB 70% mas. uzyskała większą amplitudę siły nacisku niż próbka NdFeB 50% mas. Średnia amplituda odpowiedzi A wzrosła z 0,612 N do 0,914 N, co odpowiada wzrostowi o około 49%. Odchylenie standardowe amplitudy SD_A wyniosło 0,007 N dla próbki NdFeB 50% mas. oraz 0,011 N dla próbki NdFeB 70% mas. Wartości te były niewielkie względem średnich amplitud, co wskazuje na dobrą powtarzalność odpowiedzi dynamicznej. Współczynnik zmienności obliczony dla amplitudy CV_A wyniósł około 1,14% dla próbki NdFeB 50% mas. oraz około 1,20% dla próbki NdFeB 70% mas.

Wynik ten jest zgodny z analizą statyczną siły nacisku przy 100% wypełnienia PWM, gdzie również wariant NdFeB 70% mas. generował większą siłę kontaktową. Jednocześnie próbka NdFeB 70% mas. charakteryzowała się dłuższym czasem narastania odpowiedzi. Czas narastania t_r wyniósł 0,515 s dla NdFeB 70% mas. oraz 0,321 s dla NdFeB 50% mas. Może to wskazywać, że większa zawartość fazy magnetycznej poprawia intensywność odpowiedzi, ale jednocześnie wpływa na dynamikę pracy układu. Czas opadania t_f był bardziej zbliżony dla obu próbek i wyniósł 0,256 s dla NdFeB 50% mas. oraz 0,295 s dla NdFeB 70% mas.

4. Dyskusja wyników

Uzyskane wyniki wskazują, że zwiększenie udziału procentowego NdFeB w kompozycie Ecoflex 30 wpływa zarówno na odpowiedź indukcji magnetycznej, jak i na siłę nacisku generowanego w układzie kontaktowym elektromagnes–kompozyt. Kompozyt NdFeB 70% mas. osiągał wyższe wartości B_{max} oraz większą amplitudę siły nacisku przy każdym poziomie PWM oraz większą amplitudę odpowiedzi dynamicznej siły nacisku niż próbki NdFeB 50% mas. Uzyskane wyniki potwierdzają właściwości elastomerów magnetycznie aktywnych prezentowanych w literaturze. Podwyższenie zawartości fazy magnetycznej zwiększa intensywność oddziaływania próbki z zewnętrznym polem magnetycznym [Boczkowska i Awietjan, 2012, s. 147–180; Dargahi i in., 2019, s. 269–283]. Jednocześnie wzrost udziału napełniacza NdFeB znacząco wpływa na właściwości mechaniczne kompozytu, w tym jego sztywność mechaniczną i dynamikę odpowiedzi elektromagnetycznej [Böse, 2007, s. 4790–4797]. W niniejszych badaniach widoczne było to w dłuższym czasie narastania odpowiedzi dla próbki NdFeB 70% mas.

Istotnym elementem analizy była ocena zmienności wyników. Niskie wartości współczynnika zmienności dla B_{max} oraz niewielkie odchylenia standardowe w pomiarach siły nacisku wskazują, że przy zachowaniu powtarzalnych warunków pomiaru możliwe jest uzyskanie stabilnej pracy układu elektromagnes-kompozyt. W szczególności podczas badań eksperymentalnych istotny wpływ na jakość wyników mają warunki kontaktu próbki z czujnikiem FSR. Są to: położenie próbki względem elektromagnesu, odległość sondy teslomierza od powierzchni próbki, osiowanie próbki względem czujnika FSR, wartość szczeliny powietrznej w układzie elektromagnes-kompozyt, itd.

Reasumując, analiza siły nacisku generowanej w układzie elektromagnes-materiał kompozytowy w funkcji sygnału PWM potwierdza, że badany układ umożliwia aktywne sterowanie siłą nacisku. Jest to istotne z punktu widzenia potencjalnych zastosowań w aktywnej kompresji, na przykład w profilaktyce przeciwzakrzepowej (DVT) u pacjentów unieruchomionych po operacjach. Opaska przygotowana na bazie kompozytu o właściwościach magnetycznych może generować rytmiczne impulsy uciskowe, symulując pracę mięśni i wymuszając krążenie krwi w kończynach dolnych, co zapobiega powstawaniu zakrzepów. Wyniki odpowiedzi dynamicznej siły nacisku pokazują, że wariant NdFeB 70% mas. generuje większą siłę nacisku, natomiast NdFeB 50% mas. wykazał krótsze czasy zmian siły nacisku. Oznacza to, że wybór najlepszego wariantu materiałowego powinien zależeć od planowanego zastosowania.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazała, że zwiększenie udziału NdFeB z 50% mas. do 70% mas. powoduje wzrost maksymalnej wartości amplitudy indukcji magnetycznej oraz wzrost amplitudy siły nacisku generowanej przez próbki w układzie kontaktowym elektromagnes–kompozyt. W profilu d1 średnia wartość B_{max} wzrosła z 8,21 mT do 12,66 mT, natomiast w profilu d2 z 10,27 mT do 14,29 mT.

W badaniach siły nacisku próbka NdFeB 70% mas. generowała większą statyczną siłę kontaktową w całym zakresie wysterowania elektromagnesu. Przy 100% *PWM* średni nacisk wyniósł 0,928 N dla NdFeB 70% mas. oraz 0,611 N dla NdFeB 50% mas. Oznacza to, że większa zawartość fazy magnetycznej zwiększa intensywność oddziaływania kompozytu z polem elektromagnesu.

Analiza odpowiedzi dynamicznej wykazała, że wariant NdFeB 70% mas. uzyskuje większą amplitudę odpowiedzi, ale jednocześnie charakteryzuje się dłuższym czasem narastania. Oznacza to, że zwiększenie udziału napełniacza poprawia zdolność próbki do generowania amplitudy siły nacisku, ale może wpływać na dynamikę pracy układu.

Najbardziej efektywnym wariantem pod względem wartości pola magnetycznego i nacisku okazał się kompozyt Ecoflex 30 + NdFeB 70% mas. Dalsza ocena tego wariantu powinna obejmować dokładniejszą kalibrację stanowiska, badania cykliczne oraz analizę kontaktu z materiałem imitującym tkankę miękką. Kolejne badania powinny także obejmować zwiększenie liczby powtórzeń pomiarowych i dokładniejszą ocenę niepewności pomiaru. Wskazane jest rozszerzenie zakresu badanych udziałów napełniacza, np. o próbki 40%, 60% i 80%, co pozwoliłoby dokładniej określić zależność między zawartością NdFeB a odpowiedzią magnetyczną i mechaniczną kompozytu.

Podziękowanie

Badania sfinansowano w ramach projektu „*Aktywnie sterowana elastyczna opaska magnetyczna do drenażu limfatycznego*”, MRID/WM/5/2024, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu Regionalna Inicjatywa Doskonałości 2024-2027 (kierownik projektu: dr hab. inż. Joanna Mystkowska, prof. PB).

ORCID iD

Joanna Mystkowska: https://orcid.org/0000-0002-3386-146X

Arkadiusz Mystkowski: https://orcid.org/0000-0002-5742-7609

Literatura

1. Bira N., Dhagat P., Davidson J.R. (2020), *A Review of Magnetic Elastomers and Their Role in Soft Robotics*, Frontiers in Robotics and AI.
2. Boczkowska A., Awietjan S. (2012), *Microstructure and Properties of Magnetorheological Elastomers*, Advanced Elastomers — Technology, Properties and Applications, s. 147–180.
3. Böse H. (2007), *Viscoelastic properties of silicone-based magnetorheological elastomers*, International Journal of Modern Physics B, s. 4790–4797.
4. Böse H., Gerlach T., Ehrlich J. (2021), *Magnetorheological elastomers — An underestimated class of soft actuator materials*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, s. 1550–1564.
5. Dargahi A., Sedaghati R., Rakheja S. (2019), *On the properties of magnetorheological elastomers in shear mode: Design, fabrication and characterization*, Composites Part B: Engineering, s. 269–283.
6. Jolly M.J., Carlson J. D., Munoz B. C. (1996), *A model of the behaviour of magnetorheological materials*, Smart Materials and Structures.

Static and Dynamic Characteristics of the Electromagnetic Force Generated by Flexible NdFeB Composites in Active Controlled Magnetic Field

Abstract

The objective of this paper is to evaluate the magnetic parameters, specifically the electromagnetic force generated by flexible magnetic composites based on an Ecoflex 30 silicone elastomer matrix incorporated with NdFeB filler. Two material variants, differing in the mass fraction of the micro-powder—50 wt% and 70 wt% NdFeB—were investigated, with six specimens prepared for each variant. The static and dynamic characteristics of the electromagnetic force were assessed based on the maximum magnetic induction B_{max}, deter-

mined across two perpendicular measurement configurations. Subsequently, the electromagnetic force was analyzed as the compressive force generated within an electromagnet–composite system, utilizing a Force-Sensitive Resistor (FSR). A repulsive magnetic configuration was employed, and the FSR sensor signals were recorded under varying static supply voltages as well as square-wave excitations. Data analysis was performed using descriptive statistics, including the arithmetic mean, standard deviation, and coefficient of variation. The results demonstrate that increasing the NdFeB content from 50% mas. to 70% mas. leads to higher B_{max} values, thereby enhancing the compressive force generated in the electromagnet–sample contact interface. Concurrently, the 70 wt% NdFeB variant exhibited a longer rise time for the electromagnetic force response. These findings suggest that the weight fraction of NdFeB in the composite significantly influences both the response magnitude and the operational dynamics of the material.

Key words

statistical analysis, NdFeB magnetic composite, flexible material, electromagnetic force, magnetic field.