

Mirosław ŁOZOWICKI

Akademia Techniczno-Rolnicza

w Bydgoszczy

BADANIA EKSPERYMENTALNE UKŁADU REZONANSOWEGO

LEWITACJI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki eksperymentalne układu lewitacji elektromagnetycznej z wykorzystaniem zjawiska rezonansu elektrycznego. Opisano model urządzenia unoszącego. Przeanalizowano rezultaty eksperymentu i przedstawiono wnioski dotyczące dalszego badania powyższego rozwiązania konstrukcyjnego.

1. Wstęp

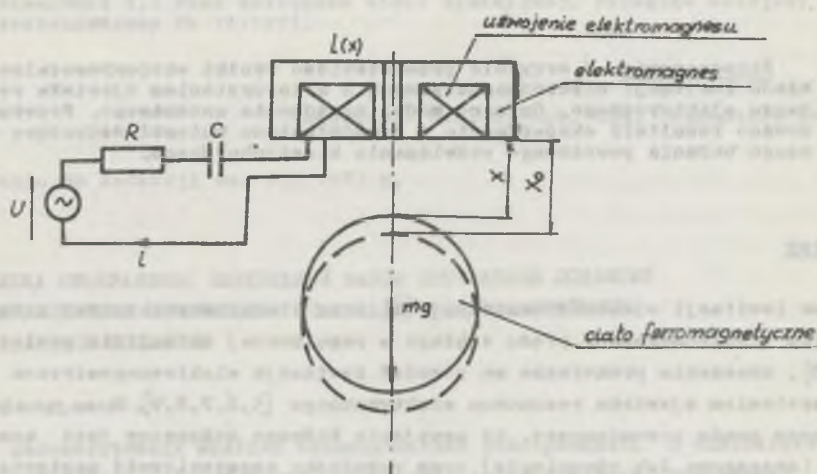
Obok lewitacji elektrodynamicznej [2] oraz elektromagnetycznej z zastosowaniem elektromagnesów prądu stałego o regulowanej szczelinie powietrznej [3], znaczenie praktyczne ma również lewitacja elektromagnetyczna z wykorzystaniem zjawiska rezonansu elektrycznego [5,6,7,8,9]. Stosując elektromagnes prądu przemiennego, do uzwojenia którego dołączony jest kondensator (szeregowo lub równoległe) oraz regulując częstotliwość napięcia zasilającego można uzyskać samostabilizację elementu ferromagnetycznego podtrzymywanego przez elektromagnes, tzn. zachować stałą szczelinę powietrzną między rdzeniem elektromagnesu a unoszonym ciałem ferromagnetycznym. O ile utrzymywanie stałej szczeliny powietrznej w elektromagnesach prądu stałego jest możliwe w układzie zamkniętym regulacji automatycznej, o tyle uzyskanie tego samego efektu za pomocą elektromagnesów prądu przemiennego nie wymaga stosowania elektrycznych sprzężeń zwrotnych.

Elektromagnesy prądu przemiennego o rezonansowym obwodzie elektrycznym są stosowane przede wszystkim w konstrukcji łożysk bezstykowych do tyroskopów, mikromaszyn elektrycznych, precyzyjnych mierników wielkości nieelektrycznych [1].

2. Opis układu rezonansowego lewitacji elektromagnetycznej

Układ lewitacji elektromagnetycznej zawierający elektromagnes prądu przemiennego o rezonansowym obwodzie elektrycznym, zwany dalej układem rezonansowym lewitacji elektromagnetycznej (rys. 1), składa się z następujących elementów:

- elektromagnesu lub elektromagnesów prądu przemiennego,
- rezonansowego obwodu elektrycznego,
- zasilacza stabilizowanego o częstotliwości regulowanej (stabilizacja częstotliwości i napięcia),
- korektora (korektorów), kiedy tłumienie drgań podtrzymywanego ciała ferromagnetycznego jest niewystarczające.



Rys. 1. Rezonansowy układ lewitacji elektromagnetycznej

Z uwagi na to, że częstotliwość prądu w uzwojeniach elektromagnesu jest rzędu od kilkuset do kilkunastu tysięcy herców, w celu minimalizacji strat wiropędowych i histerezowych najlepiej jest zastosować rdzeń proszkowy. Takie zjawiska elektromagnetyczne, jak: histereza, prądy wirowe oraz nasycenie rdzenia mają duży wpływ na pracę układu. Wartość skuteczna prądu w uzwojeniach elektromagnesu wynosi:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left[\omega L(x) - \frac{1}{\omega C}\right]^2}} \quad (1)$$

gdzie:

- U - wartość skuteczna napięcia zasilającego,
- $\omega = 2\pi f$ - pulsacja napięcia zasilającego,
- $L(x)$ - indukcyjność uzwojenia elektromagnesu zależna od szczeliny powietrznej między elektromagnesem a ciałem ferromagnetycznym podwieszonym pod nim,

C - pojemność,

R - rezystancja cewki elektromagnesu oraz przewodów łączących.

$$L(x) \sim \frac{\mu_0 S N^2}{x} \quad (2)$$

gdzie:

$$\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \text{ H/m,}$$

S - część pola powierzchni oiała podwieszonoego, do której wnika strumień magnetyczny,

N - liczba zwojów cewki elektromagnesu,

x - szczelina powietrzna.

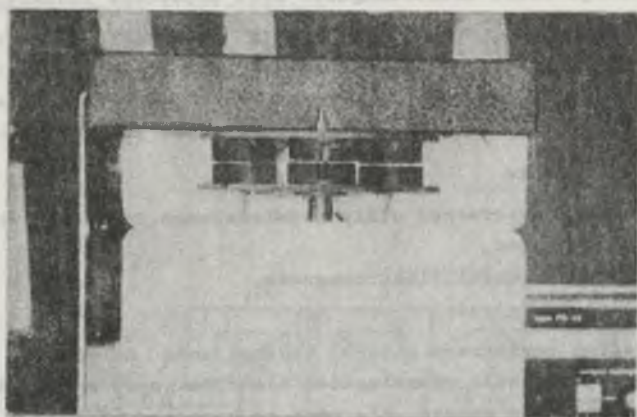
Kiedy szczelina powietrzna maleje, indukcyjność L rośnie, prąd w uzwojeniu maleje, zatem siła przyciągania elektromagnesu maleje. Element podtrzymywany zaczyna więc opadać, ale wraz ze wzrostem szczeliny powietrznej maleje indukcyjność, co z kolei powoduje wzrost prądu i siły przyciągania. Tak więc układ ma własność samostabilizacji. Układ bez pojemności w obwodzie cewki elektromagnesu charakteryzowałby się zbyt małymi zmianami prądu wraz ze zmianami szczeliny powietrznej. Dlatego też należy zastosować obwód rezonansowy o tak dobranej pojemności i częstotliwości zasilania, aby punkt pracy leżał na prawym zboczku krzywej $I = f(L)$. Niewielkie zmiany szczeliny powietrznej są wtedy przyczyną dużych zmian prądu, co stwarza warunki dobrej stabilizacji.

3. Badania eksperymentalne

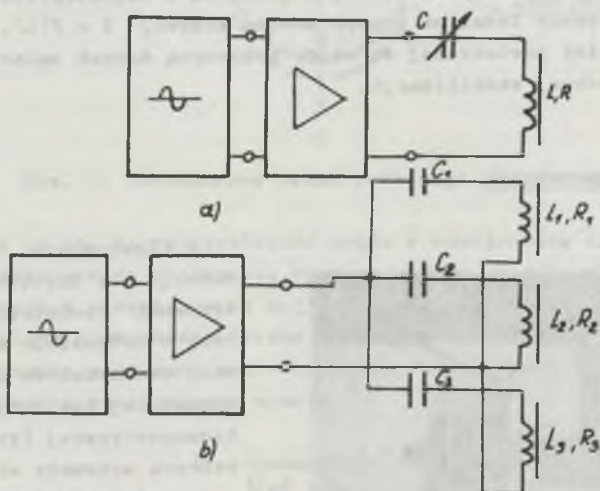


Rys. 2. Model układu rezonansowego lewitacji elektromagnetycznej z pojedynczym elektromagnesem

W Instytucie Telekomunikacji i Elektrotechniki Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy skonstruowano dwa modelowe układy rezonansowej lewitacji elektromagnetycznej (rys. 2,3), których schematy elektryczne przedstawiono na rys. 4a,b. Wykorzystano rdzenie kubkowe o średnicy zewnętrznej 36 mm oraz wysokości 11 mm wykonane z ferrytu F1001. Cewka elektromagnesu, którego schemat połączeń przedstawiono na rys. 4a, ma $N=80$ zwojów nawiniętych drutem o



Rys. 3. Model układu rezonansowego lewitacji elektromagnetycznej z trzema równolegle połączonymi elektromagnesami



Rys. 4. Schematy elektryczne modeli

a - z pojedynczym elektromagnesem, b - z trzema równolegle połączonymi elektromagnesami

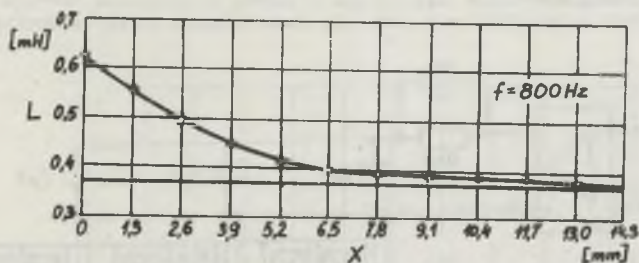
średnicy $\varnothing = 0,6$ mm. Rezystancja cewki wynosi $R = 0,6\Omega$ w temperaturze 20°C . Cewka elektromagnesu, którego schemat elektryczny przedstawiono na rys.4b, ma $N = 260$ zwojów nawiniętych drutem o średnicy $\varnothing = 0,3$ mm oraz rezystan-

cję $R = 5\Omega$ w temperaturze 20°C . Pomiary rezystancji wykonano precyzyjnym mostkiem laboratoryjnym Wheatstone'a.

Dla pojedynczego elektromagnesu przeprowadzono eksperymenty z podtrzymywaniem ciała stalowego w kształcie wydrążonego walca o średnicy 50 mm, grubości 15 mm i masie 17,009 g. W obwodzie zastosowano dekadę kondensatorów DK-50 o zakresie pojemności w przedziale $0,0001\mu\text{F} \leq C \leq 12,1110\mu\text{F}$. Stosowano częstotliwość zasilania w przedziale $900\text{ Hz} \leq f \leq 12000\text{ Hz}$.

Dla trzech elektromagnesów (trzech połączonych równolegle obwodów rezonansowych) przeprowadzono eksperymenty z podtrzymywaniem rdzeni ferrytowych opisanych wyżej i połączonych jarzmem o łącznej masie $m = 169,609\text{ g}$. W obwodzie zastosowano kondensatory mifleksowe $2\mu\text{F}/400\text{ V}$. Stosowano częstotliwości zasilania jak wyżej.

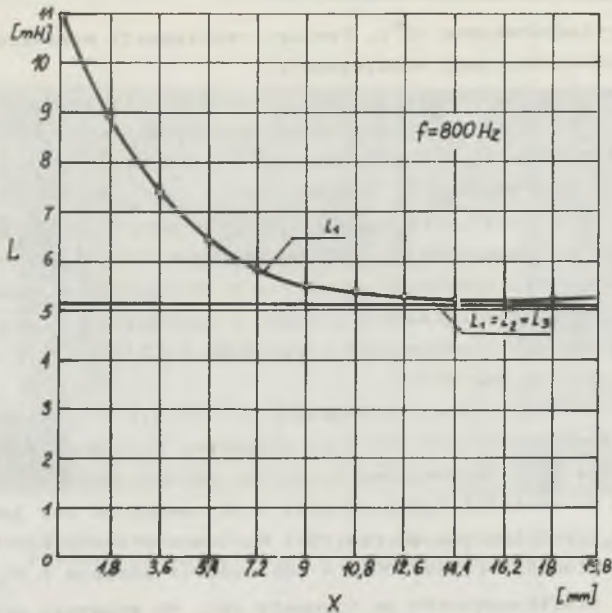
Zależność indukcyjności elektromagnesu od szczeliny powietrznej między rdzeniem a ciałem ferromagnetycznym ma charakter hiperboliczny i jest zgodna z zależnością (2). Ze wzrostem szczeliny indukcyjność maleje i dąży asymptotycznie do wartości indukcyjności elektromagnesu bez jakiegokolwiek zwory. Jest to przedstawione na rys. 5 i 6. Pomiary indukcyjności były przeprowadzone mostkiem RLC firmy ZOPAN o dokładności pomiaru 2,5%. Pomiary indukcyjności elektromagnesów ze schematu rys. 4b wykazały małe różnice między indukcyjnością poszczególnych cewek.



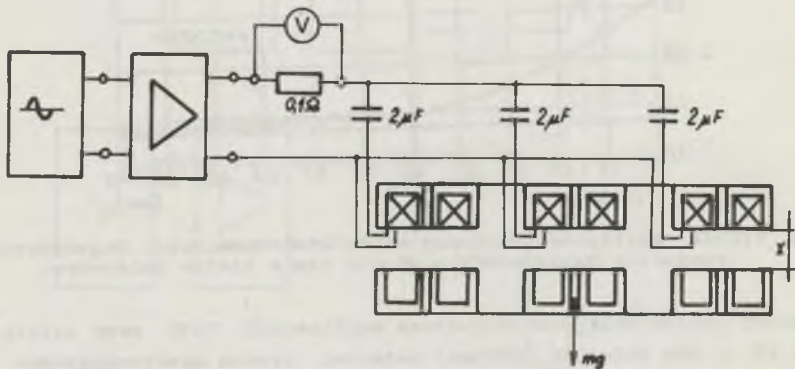
Rys. 5. Wykres zależności indukcyjności elektromagnesu pojedynczego od szczeliny powietrznej pomiędzy nim a ciałem unoszonym

Pomiary prądów były przeprowadzone multimetrem V640 przy użyciu bocznika $0,1\Omega$ w obu układach. Schemat połączeń trzech elektromagnesów jest przedstawiony na rys. 7. Wyniki pomiaru prądów przedstawiono na rys. 8,9.

Rys. 8 przedstawia zależność prądu od szczeliny $I(x)$ dla walca wydrążonego, zawieszono pod pojedynczym elektromagnesem. Pomiary były przeprowadzone przy częstotliwości zasilania $f = 6800\text{ Hz}$ dla dwóch pojemności $C = 1\mu\text{F}$ i $C = 2\mu\text{F}$, jak również dla obwodu bez kondensatora, tzn. $C = 0$. Dla częstotliwości $f = 6800\text{ Hz}$ walec wydrążony został zawieszony pod elektromagnesem przy pojemności kondensatora $C = 2\mu\text{F}$. Przy zawie-



Rys. 6. Wykres zależności indukcyjności elektromagnesów równolegle połączonych od szczeliny powietrznej pomiędzy poszczególnymi z nich a odpowiednimi zworami

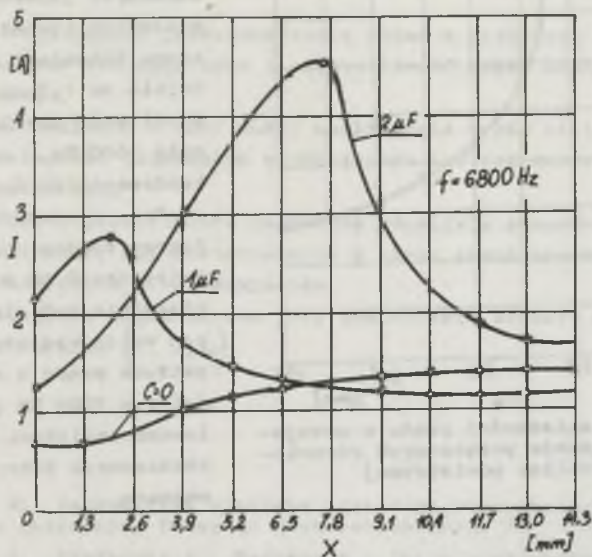


Rys. 7. Pomiarowy schemat elektryczny trzech elektromagnesów połączonych równolegle

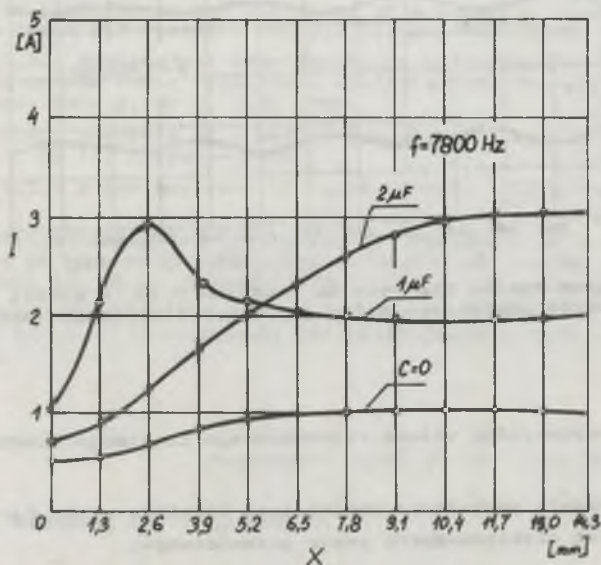
szczeniu szczelina powietrzna między rdzeniem elektromagnesu a zworą zmieniła się w zakresie od 4 do 7 mm.

Rys. 9 przedstawia również zależność $I(x)$ lecz dla częstotliwości zasilania $f = 7800$ Hz. Pomiary przeprowadzono dla trzech pojemności $C = 2\mu F$, $C = 1\mu F$, $C = 0$. Dla częstotliwości $f = 7800$ Hz walec wydrążony był zawie-

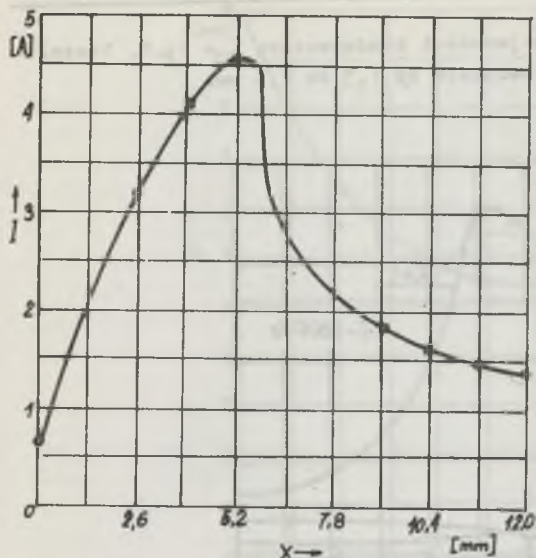
szony pod elektromagnesem przy pojemności kondensatora $C = 1 \mu\text{F}$. Szczelina powietrzna zmieniała się w przedziale od 1,3 do 2,5 mm.



Rys. 8. Wykres zależności prądu w uzwojeniu elektromagnesu od szczeliny powietrznej przy parametrach obwodu: $f = 6800 \text{ Hz}$ i $C = 0, 1 \mu\text{F}, 2 \mu\text{F}$



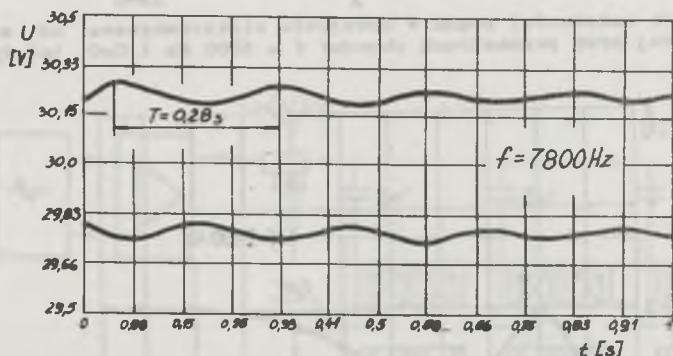
Rys. 9. Wykres zależności prądu w uzwojeniu elektromagnesu od szczeliny powietrznej przy parametrach obwodu: $f = 7800 \text{ Hz}$ i $C = 0, 1 \mu\text{F}, 2 \mu\text{F}$



Rys. 10. Wykres zależności prądu w uzwojeniach elektromagnesów połączonych równoległe od szczeliny powietrznej

Rys. 10 przedstawia zależność $I(x)$ dla podwieszania pod trzema elektromagnesami rdzeni ferrytowych połączonych jarzmem. Przy podwieszaniu szczelina powietrzna zmieniała się w przedziale od 1,3 do 3,9 mm. Częstotliwość zasilania wynosiła 1600 Hz, a pojemność kondensatorów $C = 2 \mu F$.

Rys. 11 przedstawia oscylogram spadku napięcia na dzielniku $0,1 \Omega$ w chwili zawieszania pod elektromagnesem walca wydrążonego. Amplituda prądu o częstotliwości $f = 7800$ Hz jest modulowana amplitudą drgań mechanicznych zwory elektromagnesu.



Rys. 11. Oscylogram spadku napięcia na boczniku $0,1 \Omega$ w chwili podwieszania obiektu unoszonego pod pojedynczym elektromagnesem

4. Wnioski

Badania eksperymentalne układu rezonansowego lewitacji elektromagnetycznej wykazały:

- możliwość uzyskania swobodnego zawieszania lekkiego ciała ferromagnetycznego za pomocą elektromagnesu prądu przemiennego,

- możliwość regulacji i stabilizacji szczeliny powietrznej w układzie rezonansowym (układ parametryczny regulacji automatycznej szczeliny),
- lewitacja elektromagnetyczna w układzie rezonansowym jest mało energochłonna,
- istnieje konieczność przeprowadzenia badań z większymi masami, przy których zmniejszy się amplituda i częstotliwość drgań mechanicznych ciała powieszzonego,
- drgania mechaniczne o zbyt dużej amplitudzie drgań ciała powieszzonego należy zmniejszać tłumieniem mechanicznym lub też zmniejszać amplitudę sygnału zasilania,
- zmniejszanie częstotliwości zasilania umożliwia stosowanie prostszych kształtów rdzeni, np. pakietowanych z blach transformatorowych, co m.in. ułatwia obciążenie elektromagnesów,
- najistotniejszym zagadnieniem jest znalezienie obszaru stabilnego dla zbioru parametrów $\{i, x, \omega\}$.

LITERATURA

- [1] Gieras J.: Perspektywy zjawiska lewitacji magnetycznej w szybkim transporcie naziemnym. Przegląd Elektrotechniczny Nr 1/1981, ss. 3-9.
- [2] Gieras J., Piniarski A., Bednarz W.: Praca elektromagnesów prądu stałego o regulowanej automatycznie szczelinie powietrznej w systemach lewitacji elektromagnetycznej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka 82, Gliwice 1982.
- [3] Hagihara: Performance and stability of a magnetic suspension device using a tuned LCR circuit. Control Science Vol 125, Nr 2, February 1978.
- [4] Kaplan B.Z.: Topological Considerations of Parametric Electromechanical Devices and Their Parametric Analysis IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-12, Nr 4, July 1976.
- [5] Kaplan B.Z.: Analysis of a method for magnetic levitation. Proc. IEEE, Vol. 114, Nr 11, November 1967.
- [6] Kaplan B.Z.: A new analysis of tuned circuit levitators, Pergamon Press, 1974.
- [7] Kaplan B.Z.: Estimation of mechanical transients in tuned-circuit. Levitators by employing steady-state impedances. Journal of Applied Physics, Vol. 47, Nr 1, January 1976.
- [8] Richard H., Frazier, Philip J., Gilinson Jr., George A. Obwbeck: Magnetic and Electric Suspensions. The Massachusetts Institute of Technology 1974.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Władysław Paszek

Wpłynęło do Redakcji dn. 20.I.1983 r.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ

Резюме

Описаны результаты эксперимента со схемой электромагнитной левитации с применением явления электрического резонанса. Представлена модель. Проанализированы результаты полученные в эксперименте и предложены выводы касающиеся дальнейшего исследования конструкционного решения.

THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF ELECTROMAGNETICAL
LEVITATOR WITH A TUNED LRC CIRCUIT

Summary

Experimental results of a magnetic suspensions device utilizing a tuned LRC circuit are presented. Model of a levitation device is described. Analysis of experimental results are considered and conclusions due to further investigations of a proposed solution are presented.

