

Maksymilian MAŚLANKA<sup>1</sup>

Opiekun naukowy: Daniel JANCARCZYK<sup>2</sup>

## **ELEKTROMAGNETYCZNY LINIOWY AKCELERATOR GAUSSA: PROJEKT I REALIZACJA**

**Streszczenie:** Niniejszy artykuł koncentruje się na zagadnieniach związanych z zaprojektowaniem i realizacją liniowego akceleratora Gaussa, zwanego również działem Gaussa. Poruszony zostanie również temat druku 3D. Pierwszą częścią artykułu jest uproszczony opis zasady działania urządzenia. Następnie opisano projekt oraz poszczególne etapy realizacji. W ostatniej części przedstawiono podsumowanie prac i zestawienie kosztowe.

**Słowa kluczowe:** akcelerator, działo Gaussa, przetwornica

## **ELECTROMAGNETIC LINEAR GAUSSIAN ACCELERATOR: DESIGN AND IMPLEMENTATION**

**Summary:** This article focuses in issues related to the design and implementation of a linear Gaussian accelerator, also known as a coilgun. The topic of 3D printing will also be discussed. The first part of the article is a simplified description of operating principles of the device. Then, the construction proces and encountered problems were briefly described. The last part presents a summary of the work and a cost breakdown.

**Keywords:** accelerator, coilgun, converter

### **1. Wprowadzenie**

Liniowy akcelerator Gaussa jest urządzeniem służącym do akceleracji (przyspieszania) ciał – w tym przypadku ferromagnetycznego walca o średnicy 3mm. Nazwa działo Gaussa nawiązuje do Carla Friedricha Gaussa, który dokonał matematycznego opisu elektromagnetycznego oddziaływania i zastosowania tego oddziaływania w magnetycznych akceleratorach [1]. Akceleratory liniowe jak i kołowe znajdują swoje zastosowanie między innymi w synchrotronach, gdzie bada się wpływ promieniowania synchrotronowego na różne materiały [2]. Służą one

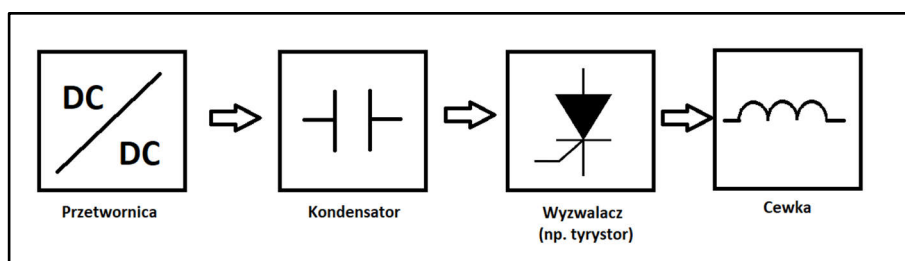
---

<sup>1</sup> Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Automatyka i robotyka, e-mail: m.maslanka@poczta.onet.pl

<sup>2</sup> dr inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, e-mail: djancarczyk@ubb.edu.pl

również do budowy elektromagnetycznych wyrzutni liniowych [3-5]. Najprostszy akcelerator liniowy składa się z cewki, wyzwalacza i odpowiednio dobranego kondensatora. Wyzwalacz to zwykle tyrystor bądź tranzystor IGBT [5]. Elementy energoelektroniczne stosowane są ze względu na odporność na udary prądowe [6]. Poprzez układ wyzwalający na cewkę podawane jest napięcie z uprzednio naładowanego kondensatora. Impuls prądowy powoduje powstanie w cewce pola magnetycznego, które jeśli jest odpowiednio silne przyciąga materiały ferromagnetyczne. Impuls ten nie powinien trwać zbyt długo ponieważ może spowolnić pocisk, a nawet go zatrzymać w środku cewki. Impuls zbyt krótki natomiast może nie spowodować żadnej reakcji – pole magnetyczne będzie zbyt słabe aby poruszyć pocisk [7].

Na rysunku 1 przedstawiony został prosty ideowy schemat blokowy działania akceleratora. Przetwornica DC/DC ładuje kondensator do zadanego napięcia, po czym wyłącza się. Następnie rozładowanie kondensatora przez cewkę przy użyciu wyzwalacza tworzy pole magnetyczne w cewce. Proces można powtarzać po całkowitym rozładowaniu kondensatora, kiedy tyrystor przestaje przewodzić.

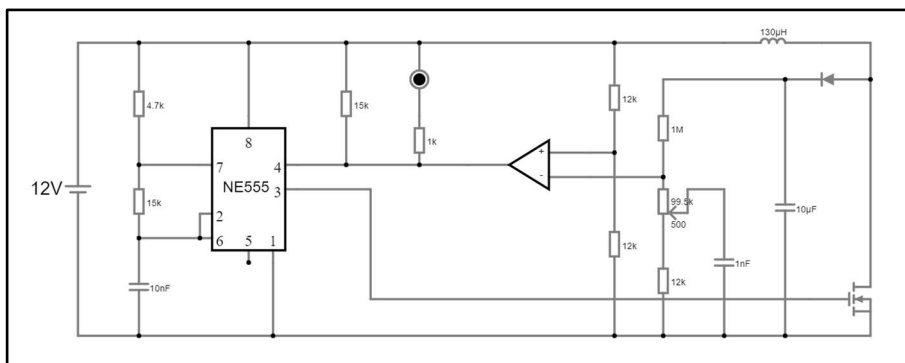


Rysunek 1. Schemat blokowy zasady działania akceleratora od strony elektronicznej [opracowanie własne]

Wszystkie elektroniczne elementy urządzenia powinny charakteryzować się dużą odpornością na udary prądowe, nawet rzędu setek amper w czasie kilku milisekund. Ponadto należy zadbać o odpowiedni przekrój przewodów aby zminimalizować opór oraz straty energii. Kondensator lub cała ich bateria powinny być tak dobrane, aby ich pojemność nie była zbyt duża. Mogłoby doprowadzić to do utknięcia pocisku w cewce. Cewka natomiast powinna zostać odpowiednio zaizolowana ze względu na stosunkowo wysokie napięcie – minimalizuje to ryzyko przebieć międzywojowych.

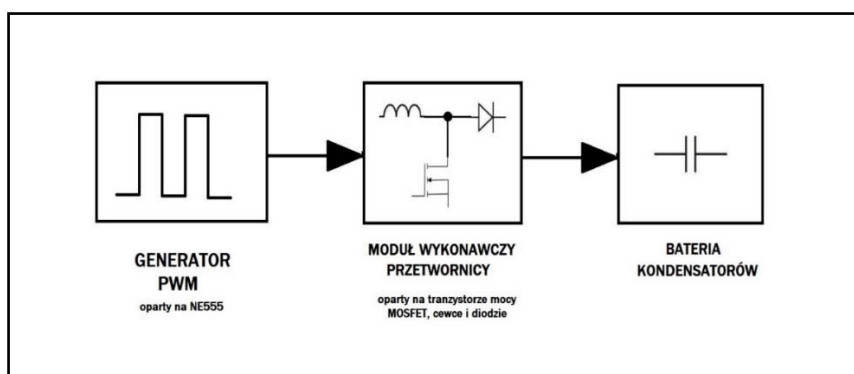
## 2. Przebieg projektowania oraz budowy

W pierwszej kolejności zaprojektowana została prosta przetwornica DC-DC typu boost-converter, służąca do ładowania baterii kondensatorów wysokim napięciem. Podobne przetwornice są szeroko stosowane. Zasilana jest z trzech ogniw Li-Ion 18650 o pojemności około 2000mAh każda, połączonych szeregowo. Początkowo pracę układu zasymulowano w darmowym programie Falstad, a następnie w z wykorzystaniem profesjonalnego oprogramowania OrCAD firmy Cadence. Na rysunku 2 przedstawiono początkowy schemat układu.



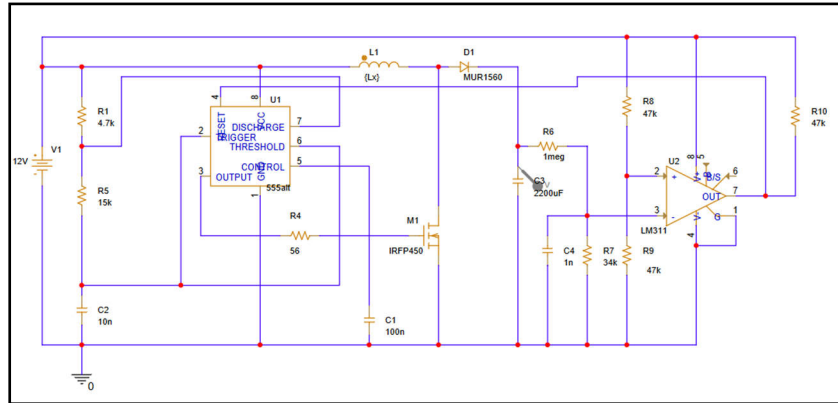
Rysunek 2. Schemat przetwornicy w programie Falstad [opracowanie własne]

Jak można zauważyć, przetwornica ta składa się z dwóch części – generatora przebiegu prostokątnego zbudowanego na układzie 555, oraz komparatora zapobiegającego przeładowaniu kondensatorów. Sama przetwornica składa się z cewki nawiniętej na ferromagnetyczny rdzeń, diody prostowniczej, kondensatora oraz tranzystora MOSFET. Przerwanie przepływu prądu przez tranzystor wymusza jego przepływ przez diodę prostowniczą oraz kondensator, który jest ładowany. Energia kumulowana jest w cewce, która jest elementem zachowawczym, więc wymusza przepływ prądu. Na rysunku 3 przedstawiono prosty blokowy schemat ideowy przetwornicy.



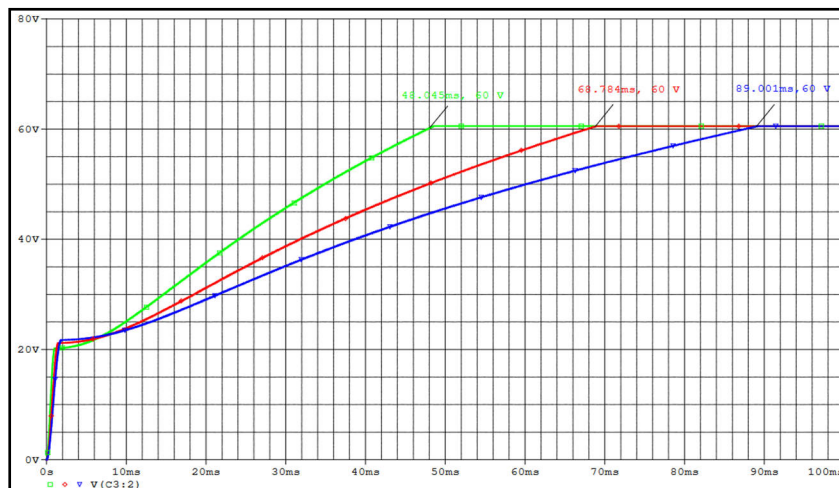
Rysunek 3. Ideowy schemat blokowy przetwornicy [opracowanie własne]

Po wykonaniu symulacji w programie Falstad, wykonano analizy w programie OrCAD. Na rysunku 4 przedstawiono finalny schemat przetwornicy stworzony w wyżej wymienionym programie.



Rysunek 4. Schemat przetwornicy w programie OrCAD [opracowanie własne]

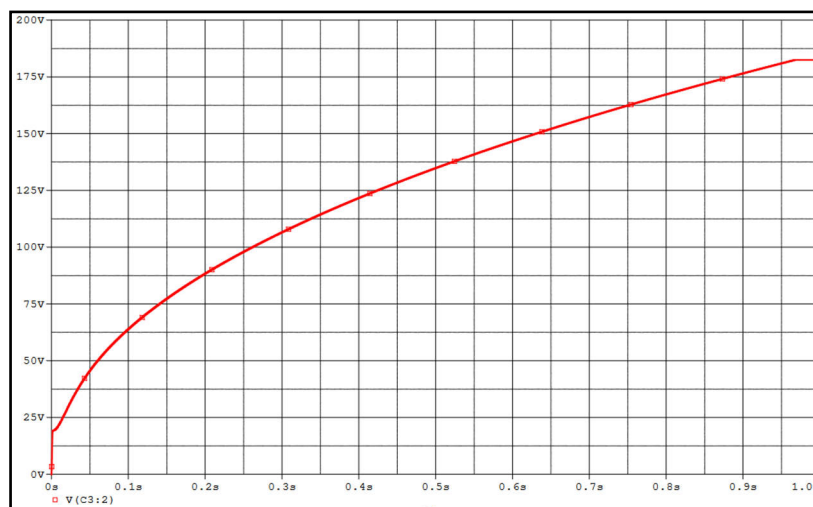
Przeprowadzono analizę parametryczną transient. Zmieniano skokowo wartość indukcyjności cewki L1 do wartości: 100uH, 200uH oraz 300uH. Wykres zależności napięcia od czasu przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Wykres zależności napięcia na kondensatorze C3 w funkcji czasu w zależności od wartości indukcyjności cewki L1 [opracowanie własne]

Z powyższego wykresu można zauważyć, że końcowe napięcie jest takie samo dla wszystkich badanych wartości indukcyjności cewki L1. Zmienia się za to czas, w którym napięcie to zostanie osiągnięte. Najkrótszy czas ładowania kondensatora otrzymano dla wartości indukcyjności równej 100uH.

Dla rzeczywistej wartości pojemności oraz indukcyjności użytych w projekcie elementów, czas ładowania kondensatora wynosi około jednej sekundy. Przebieg procesu ładowania przedstawia rysunek 6.



Rysunek 6. Wykres przebiegu ładowania kondensatora [opracowanie własne]

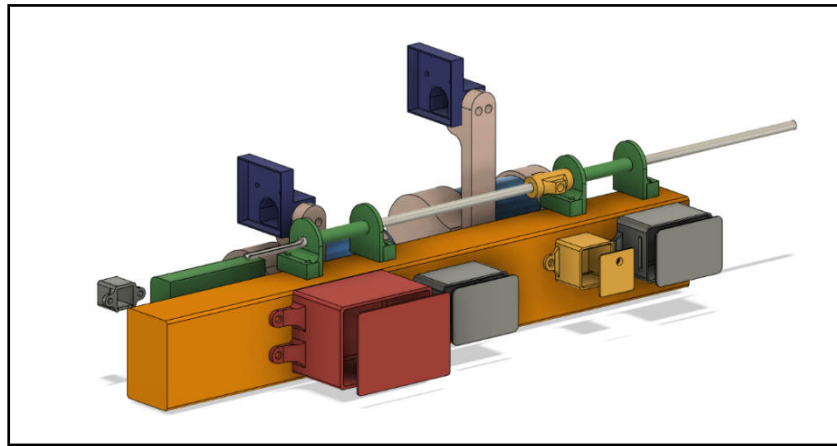
Teoretyczny czas ładowania baterii kondensatorów o pojemności 2200uF do napięcia 180V powinien trwać około sekundy. W rzeczywistości jednak wartość prądu płynącego przez cewkę została ograniczona poprzez montaż żarówki szeregowo z przetwornicą. Pozwoliło to na zmniejszenie udarów prądowych i obciążenia ogniwi Li-Ion 18650. Rzeczywisty czas ładowania wynosi więc około 15 sekund. Rozwiązanie to pozwoliło na zmniejszenie nagrzewania się tranzystora MOSFET, a jednocześnie nie zmieniło znacząco naukowego przeznaczenia modelu.

Większość mechanicznych elementów modelu, takich jak na przykład karkas cewki roboczej lub osłony i obudowy została stworzona przy użyciu technologii druku 3D. Pozwoliło to na znaczące zmniejszenie kosztów budowy urządzenia, oraz na relatywnie dużą łatwość modyfikacji elementów. Przy projektowaniu urządzenia brano pod uwagę ograniczenia technologii, to jest: brak możliwości drukowania „w powietrzu” co wymusiło stosowanie podpór, oraz ograniczoną wytrzymałość mechaniczną i termiczną. Wszelkie ostre kąty dla zwiększenia wytrzymałości zostały zaokrąglone. Jako wypełnienie modeli wybrano opcję tri-hexagonal z uwagi na zwiększoną wytrzymałość w stosunku do innych wzorów wypełnienia modeli. Grubość ścianek modelu ustawiono między 2 a 4 szerokości dyszy drukarki. Wysokość warstw dobrano eksperymentalnie poprzez wielokrotne tworzenie i udoskonalanie projektu.

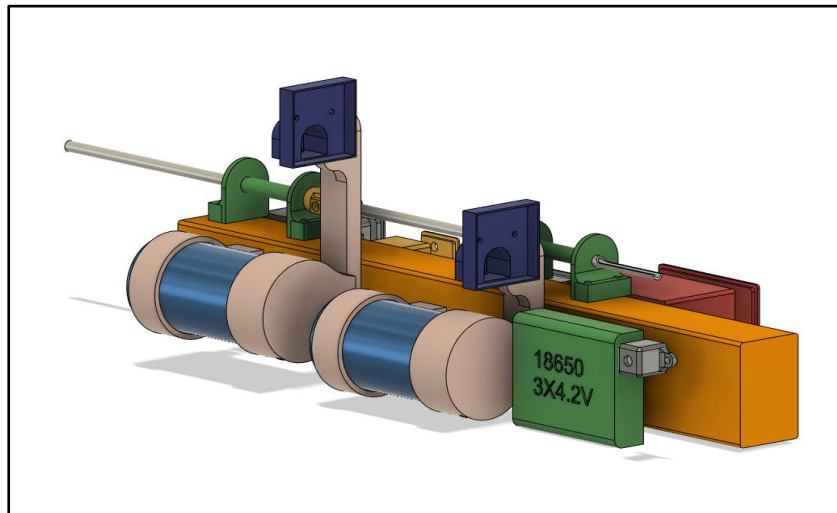
Elementy elektroniczne, takie jak przetwornica i moduły sterowania czujników zostały zlutowane na płytkach uniwersalnych. Nie tworzono specjalizowanych płytek PCB, z uwagi na stosunkowo prosty układ elementów i prototypowy charakter pracy. Z uwagi na występowanie wysokich napięć, wszystkie moduły oraz przełączniki zostały zamontowane w obudowach, a przewody zostały dodatkowo zaizolowane.

Podczas budowy modelu pojawiło się wiele trudności i problemów, które związane były bezpośrednio z kolejnymi etapami fizycznej realizacji urządzenia. Elementy drukowane przy użyciu biodegradowalnego filamentu łamały się i szybko traciły swoje właściwości. Umieszczenie elementów służące zmniejszeniu rozmiarów modelu do bardziej kompaktowych sprawiło, że prowadzenie przewodów oraz ich

lutowanie było bardzo utrudnione. Nierównomierne ustawienie modułów sprawiło, że model ma tendencję do przewracania się w stronę kondensatorów. Wykorzystanie dwóch różnych cewek roboczych, o innych przekrojach przewodów wymusza przeprowadzenie odpowiednich regulacji czujnika optycznego, aby pocisk nie zwalniał ani się nie cofał po akceleracji pierwszą cewką. Docelowy wygląd modelu i rozmieszczenie elementów przedstawiono na poniższych rysunkach 7-10.

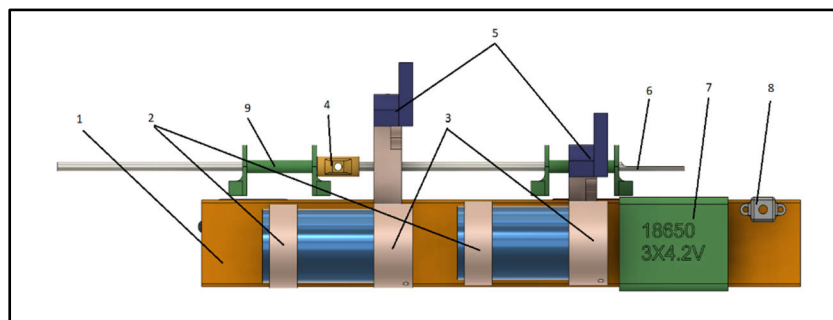


Rysunek 7. Model 3D urządzenia [opracowanie własne]

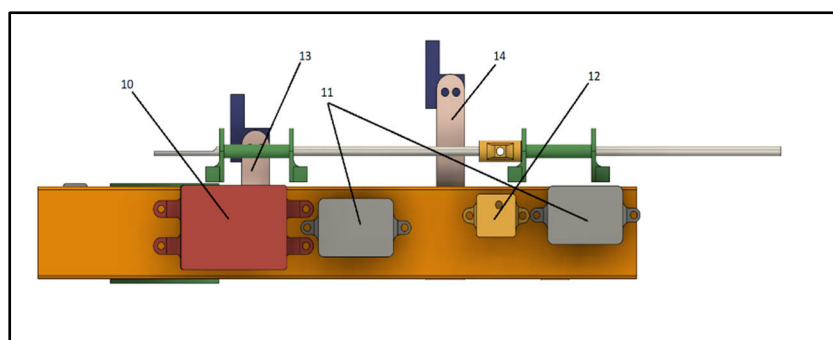


Rysunek 8. Model 3D urządzenia [opracowanie własne]

Na rysunkach 9 oraz 10 przedstawiono rzuty modelu z lewej i prawej strony. Natomiast w tabeli 1 przedstawiono specyfikację elementów modelu w odniesieniu do rysunków 9 oraz 10.



Rysunek 9. Widok z lewej strony [opracowanie własne]



Rysunek 10. Widok z prawej strony [opracowanie własne]

Tabela 1. Opis części modelu

1	Korpus	8	Obudowa przełącznika wyboru ładowanego kondensatora
2	Mocowanie górne kondensatora	9	Cewka robocza
3	Mocowanie dolne kondensatora	10	Obudowa modułu przetwornicy
4	Czujnik optyczny	11	Obudowa modułu wyzwalacza
5	Obudowa woltomierza	12	Obudowa modułu sterownika czujnika optycznego
6	Prowadnica liniowa (lufa)	13	Wspornik woltomierza (krótki)
7	Ogniwa Li-Ion 18650	14	Wspornik woltomierza (długi)

### 3. Podsumowanie

Projektowanie i budowa modelu akceleratora magnetycznego były bardzo ambitnym i wymagającym zadaniem. Jednym z głównych założeń projektu była niska cena, stąd niezbyt wyszukany design modelu. Wykorzystanie części wylutowanych z innych urządzeń nie zawsze było dobrym pomysłem. Przetwornica bez ograniczenia prądowego była w stanie przepalić 10A bezpiecznik, oraz mocno się grzała. Druk 3D pozwolił na zmniejszenie kosztów budowy, lecz osłabił wytrzymałość mechaniczną i termiczną konstrukcji. Biodegradowalny filament z recyklingu był bardzo niskiej

jakości, co wymusiło zmianę na droższy. Główny element konstrukcji, czyli kondensatory nie posiadają już deklarowanej przez producenta pojemności – pochodzą z demontażu falownika. Jednakże finalnie model działa i można przedstawić za jego pomocą ideę liniowego napędu magnetycznego. Szacunkowe zestawienie kosztów wykonania projektu przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Szacunkowe zestawienie kosztowe projektu

Druk 3D – prototypowanie i wydruk finalnych części, filament, koszty energii elektrycznej	400 zł
Elementy elektroniczne nowe	120 zł
Elementy elektroniczne używane	15 zł
Przewody elektryczne	30 zł
Drut nawojowy (różne średnice, szpule po 100g)	200 zł
Ogniwa Li-Ion wraz z ładowarką	80 zł
Razem	445 zł

Przedstawione w powyższej tabeli koszty są jedynie orientacyjne, na projekt i realizację modelu przeznaczono około 300 godzin pracy. Wydruk części prototypowych oraz finalnych oszacowano na 80 godzin pracy drukarki. W kosztorysie nie zostały ujęte koszty związane z zużyciem i eksploatacją drukarki 3D oraz koszty zakupu sprzętu (stacja lutownicza, oscyloskop, zasilacz laboratoryjny, drukarka 3D).

## LITERATURA

- HINAJE M., NETTER D.: Influence of the projectiles' material in a coilgun, *European Journal of Physics*, Volume 27, Number 5, 2006.
- Serwis internetowy: <https://synchrotron.uj.edu.pl/dla-gosci-i-mediow/solaris-w-pigulce>, 05.10.2023.
- KROCZEK R., DOMIN J., KLUSZCZYŃSKI K.: Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych wyrzutni elektromagnetycznych oraz ich klasyfikacja, II Kongres Elektryki Polskiej, 1-2.12. 2014 Warszawa, 389-398.
- KLIMAS M., GRABOWSKI D., PIASKOWY A.: Efficiency Analysis of an Electromagnetic Launcher, *Elektryka*, Zeszyt 2 (238), 2016, 33-48.
- XI T., SHUHONG W., YOUPENG H., SONG W., YUQIONG W.: Geometry and power optimization of coilgun based on adaptive genetic algorithms, *IEEE Transactions on Plasma Science* 2015, vol. 43, no. 5, 1208-1214.
- KESHTKAR, A., GHARIB, L., ABBASI, M.: Comparison between conventional railgun and two-turn railgun by 3D- FEM, In: 2012 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 May 15-19, 1-5.
- ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SOBAŃSKI P.: Przegląd dwupoziomowych falowników napięcia odpornych na uszkodzenia tranzystorów IGBT, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, Nr 69, 2013, 54-69.
- SKALA B., KINDL V.: Electromagnetic Coil Gun – Construction and Basic Simulation, In: Březina, T., Jabłoński, R. (eds) *Mechatronics 2013*. Springer, Cham., 87-93.