



FUNKCJONALNY DRUK 3D W SZKOLNEJ PRACOWNI – MODELE EDUKACYJNE, NARZĘDZIA UŻYTKOWE I WŁASNA DRUKARKA W OPARCIU O TECHNOLOGIĘ FDM

Anna Szymkowiak, Ewa Ankiewicz-Jasińska, Zbigniew Szymański
Miejski Ośrodek Nauczycieli w Bydgoszczy,
Jana III Sobieskiego 10, 85-060 Bydgoszcz
Zespół Szkół Mechanicznych nr 1 im. F. Siemiradzkiego
w Bydgoszczy, ul. Św. Trójcy 37, 85-224 Bydgoszcz
e-mail autora: anna.szymkowiak@moen.edu.bydgoszcz.pl,
ewa.ankiewicz-jasinska@o2.pl, zszyman@wp.pl

Abstract. The article presents practical applications of additive manufacturing (FDM 3D printing) in school technical education, combining an engineering approach with elements of artificial intelligence (AI) support. The material is based on the analysis of three diverse case studies that illustrate different levels of project complexity: educational models (Enigma), utility tools (Garden Claws), and a custom-built 3D printer (Positron LT). The implementation of 3D printing combined with AI allows the school environment to be transformed into a modern laboratory, where theory seamlessly intertwines with engineering practice, fostering creative problem-solving skills among youth.

1. Wprowadzenie

Rozwój infrastruktury technologicznej w polskich szkołach, napędzany między innymi przez ogólnopolskie programy takie jak *Laboratoria Przyszłości*, doprowadził do nasycenia placówek edukacyjnych urządzeniami do szybkiego prototypowania, w tym drukarkami pracującymi w technologii FDM (Fused Deposition Modeling). Sama obecność sprzętu nie gwarantuje sukcesu dydaktycznego. Obserwacje praktyki szkolnej wskazują na częste zjawisko ograniczania wykorzystania drukarek 3D do odtwarzania gotowych, pobranych z Internetu modeli o charakterze wyłącznie gadżetowym.

Zachodzi konieczność przejścia od biernego konsumowania modeli cyfrowych do aktywnego, inżynierskiego ich tworzenia i modyfikowania. Przyjęto hipotezę, iż optymalne wykorzystanie potencjału technologii przyrostowych w szkole wymaga wdrożenia wielopoziomowego modelu edukacyjnego. Model ten powinien prowadzić ucznia od zrozumienia mechaniki (praca z zaawansowanymi modelami edukacyjnymi), poprzez projektowanie własnych rozwiązań pod konkretne wymagania wytrzymałościowe (narzędzia użytkowe), aż po głęboką ingerencję w architekturę sprzętową maszyn CNC (budowa autorskich drukarek).

W celu weryfikacji tego założenia, w artykule poddano analizie trzy zrealizowane projekty techniczne, które mogą stanowić wzorzec metodyczny dla nauczycieli informatyki, techniki oraz przedmiotów zawodowych.

2. Środowisko sprzętowe i metodyka pracy

Wszystkie opisywane w artykule projekty zostały zrealizowane w oparciu o środowisko CAD oraz drukarki 3D. Projekty własne i modyfikacje przeprowadzano w oprogramowaniu Autodesk Fusion 360, co pozwoliło na zachowanie pełnej parametryczności modeli. Wszystkie zaprojektowane elementy zostały wydrukowane na drukarkach 3D Bambu Lab A1 mini oraz Bambu Lab P1S.

Wykorzystanie nowoczesnych urządzeń o zamkniętej kinematyce (CoreXY w przypadku P1S) oraz zaawansowanych algorytmach kompensacji wibracji (Input Shaping) pozwoliło na uzyskanie wysokiej tolerancji wymiarowej, co było kluczowe w przypadku elementów współpracujących mechanicznie oraz elementów złącznych. Jako materiały bazowe wykorzystano polimery PLA (ze względu na sztywność i łatwość druku detali) oraz PETG (z uwagi na jego elastyczność, udarność i odporność na warunki atmosferyczne).

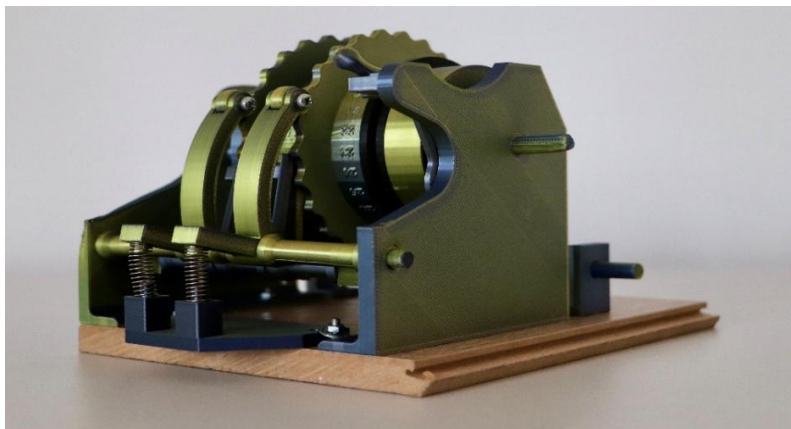
3. Studium przypadku I: Zrozumienie mechaniki – model kinematyki maszyny Enigma

Pierwszym etapem wdrażania zaawansowanej edukacji technicznej jest praca z modelami demonstracyjnymi, które wizualizują skomplikowane procesy mechaniczne i logiczne. Przedmiotem analizy jest funkcjonalny fragment modelu maszyny szyfrującej Enigma.

3.1. Założenia dydaktyczne i mechanika modelu

Głównym celem przygotowania tego układu było fizyczne zaprezentowanie zasady działania bębnow kodyujących (wirmików) oraz zobrazowanie kinematyki całego układu, ze szczególnym uwzględnieniem mechanizmu skokowego, w jaki bębny są poruszane podczas pracy urządzenia.

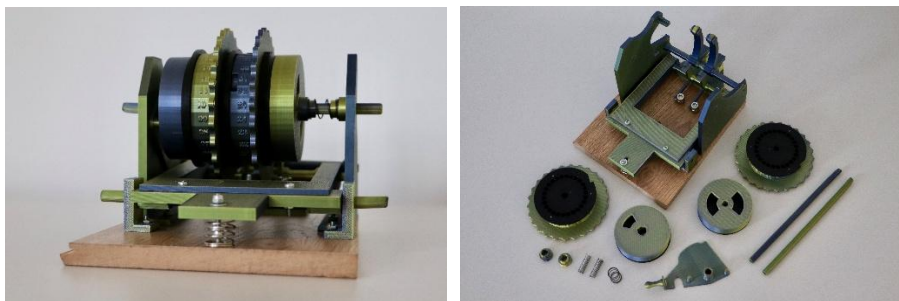
Model bazowy został zaczerpnięty z otwartego repozytorium Thingiverse (projekt thing:1813308). Wymagał on jednak adaptacji w celu zapewnienia płynnej pracy w warunkach szkolnych demonstracji. Kluczową autorską modyfikacją było uzupełnienie układu o specjalnie zaprojektowane dźwignie z rolkami indeksowymi.



Rysunek 1. Detal mechanizmu dźwigni z rolkami indeksowymi i sprężynami naciagowymi, stabilizującymi położenie bębnow kodujących. Wyraźnie widoczna struktura warstw charakterystyczna dla druku FDM

Prezentowany model kinematyczny stwarza również rzadką okazję do empirycznego zaobserwowania mechanizmu asynchronicznego obrotu bębnow. Uczniowie mogą dostrzec, że kolejne wirniki obracają się dopiero w momencie, gdy zapadka napędowa natrafi na odpowiednie wcięcie w poprzedzającym bębnie (jeden skok na 26 obrotów pierwszego wirnika).

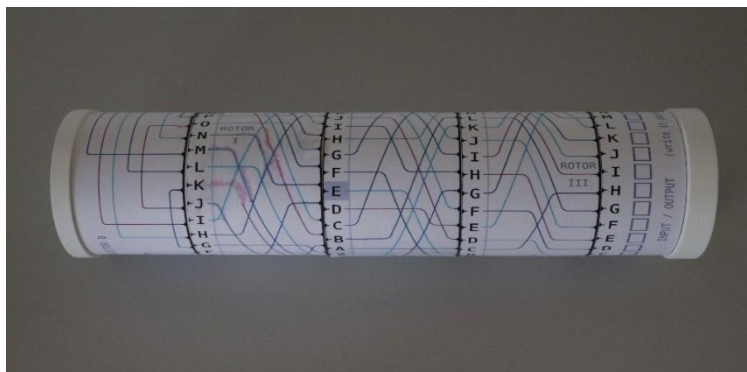
Zadaniem dodanych dźwigni jest precyzyjna stabilizacja położenia bębnow po wykonaniu kroku (pojedynczego obrotu). W historycznym, oryginalnym urządzeniu mechanizm ten (ang. levers with index wheels) był absolutnie kluczowy – gwarantował on, że po każdym uderzeniu w klawisz bębny zatrzymają się w idealnej pozycji, umożliwiając poprawne złączenie wewnętrznych styków elektrycznych między wirnikami. Zastosowanie mechanizmu sprężynującego pozwala na wyczuwalny, skokowy opór, który doskonale imituje pracę prawdziwych mechanizmów zapadkowych z lat 30. XX wieku.



Rysunek 2. Złożony i rozłożony model kinematyczny Enigmy z widocznymi zębatkami, osią główną oraz naniesioną numeracją na bębnach

3.2. Obrazowanie logiki szyfrowania

Podczas gdy mechaniczny model 3D odpowiada za demonstrację ruchu bębnow, drugi element układu – oparty na projekcie thing:3936519 – służy do wizualizacji przepływu sygnału elektrycznego. Aby pomóc uczniom zrozumieć, jak prąd przepływa przez kolejne bębny, przygotowano model w kształcie walca z nadrukowanym schematem połączeń.



Rysunek 3. Model bębna ilustrujący wewnętrzne, krzyżowe połączenia elektryczne (tzw. "pająk") charakterystyczne dla wirników Enigmy I, II i III



Rysunek 4. Zbliżenie na schemat ścieżek sygnałowych, pokazujące mechanizm zamiany poszczególnych liter alfabetu wewnątrz systemu wirników

Dzięki połączeniu przestrzennego druku 3D (Rys. 1, 2) z rozwinięciem topologicznym na cylindrze (Rys. 3, 4), uczeń może w przystępny sposób połączyć ruch mechaniczny z wynikiem algorytmicznym. Dzięki modelowi uczniowie są w stanie prześledzić drogę sygnału, który – jak udowadniają to współczesne wizualizacje multimedialne [7] – tylko w samej sekcji bębnow i reflektora ulega aż siedmiokrotnej modyfikacji, zanim trafi do panelu świetlnego. Modele wykonano na drukarce Bambu Lab A1 mini, co udowadnia, że nawet drukarki o niewielkim polu roboczym są w stanie produkować wysoce funkcjonalne, wieloelementowe pomoce dydaktyczne.

4. Studium przypadku II: Projektowanie od podstaw – narzędzie użytkowe "Pazurki"

Drugi poziom kompetencyjny zakłada przejście od modyfikacji do samodzielnego modelowania CAD obiektów, które muszą spełniać określone funkcje użytkowe i znosić obciążenia mechaniczne. Dobrym przykładem takiego podejścia w szkolnej pracowni jest projekt ogrodowych narzędzi ręcznych ("Pazurków").

4.1. Proces projektowy i dobór parametrów

Projekt został w całości wykonany w środowisku Autodesk Fusion 360. Kompletnie narzędzie składa się z ergonomicznej rączki, elementu mocującego oraz pięciu wymienionych pazurków. Z uwagi na bezpośredni kontakt z ziemią oraz działanie sił zginających, narzędzie wymagało użycia materiału o znacznie wyższej wytrzymałości mechanicznej

niż standardowo stosowane w edukacji PLA. Zastosowano filament PETG (politereftalan etylenu z domieszką glikolu) ze względu na jego wytrzymałość na uderzenia, odporność chemiczną i znacznie lepszą adhezję warstw (co zapobiega pękaniu wzdłuż osi Z podczas pracy). Elementy wydrukowano na maszynie Bambu Lab P1S w zamkniętej komorze.



Rysunek 5. Ewolucja projektowa narzędzia ogrodowego. Na zdjęciu widoczna pierwsza iteracja (pomarańczowa), która podczas testów ulegała uszkodzeniom mechanicznym (pęknięciom) oraz zoptymalizowana, docelowa wersja (zielona) o zmodyfikowanej geometrii części roboczej i zwiększonej wytrzymałości

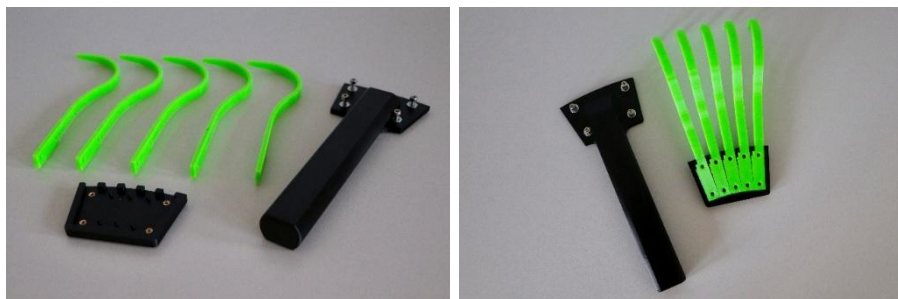
4.2. Inżynieria zmiennej sztywności i połączenia mechaniczne

Kluczowym walorem inżynieryjnym i dydaktycznym tego projektu jest parametryzacja. Projekt umożliwia dobór sztywności części roboczej poprzez zaprojektowanie pazurków o różnej grubości: 2,5 mm, 3,0 mm oraz 3,5 mm. Pozwala to na empiryczne testowanie przez uczniów prawa Hooke'a i zagadnień z zakresu wytrzymałości materiałów – cieńsze pazurki sprawdzają się przy delikatnym spulchnianiu, grubsze przy twardszej glebie.

Projekt zapoznaje uczniów z technikami łączenia wydruków FDM. Zaprojektowano dwie wersje elementu mocującego pazurki do rączki:

1. Wersja pod standardowe nakrętki M3 wsuwane w dedykowane gniazda.
2. Wersja przystosowana do instalacji mosiężnych insertów gwintowanych M3x3,5 wtapianych w plastik za pomocą lutownicy (heat-set inserts)

Montaż całości realizowany jest śrubami M3x10. Rozwiązanie to uczy, że druk 3D w inżynierii rzadko funkcjonuje samodzielnie, a optymalne rezultaty osiąga się łącząc tworzywa sztuczne z elementami metalowymi (śruby, nakrętki, łożyska).



Rysunek 6. Modułowa konstrukcja narzędzia ogrodowego. Zdemontowana część robocza (zespół pazurków) oraz rękojeść zintegrowana z głównym elementem mocującym

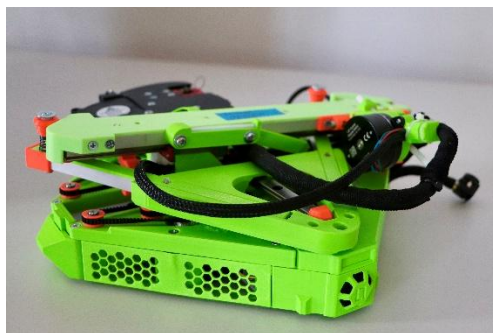
5. Studium przypadku III: Budowa mechatroniczna i inżynieria wsteczna – Drukarka Positron LT

Najbardziej zaawansowanym etapem nauki druku 3D jest moment, gdy technologia ta służy do budowania i ulepszania kolejnych drukarek. Bazą do takiej nauki jest idea RepRap. Idea maszyn zdolnych do samoreplikacji obecna jest w myśli technicznej od wielu lat. Od dawna naukowcy tworzyli hipotetyczne koncepcje budowy maszyn, które potrafią zbudować własną kopię. Jedną z takich koncepcji narodziła się na Uniwersytecie w Bath w Wielkiej Brytanii. W 2004 r. dr Adrian Bowyer, brytyjski inżynier i matematyk, wykładowca na Uniwersytecie w Bath, opracował projekt samopowielającej się drukarki 3D RepRap.

W projekcie szczegółowo przeanalizowano konstrukcję – drukarki Positron LT.

5.1. Założenia konstrukcyjne Positron LT

Positron LT to kompaktowa, składana drukarka 3D zaprojektowana dla osób poszukujących mobilności. Jej konstrukcja (bazująca na projekcie Positron V3) jest odwrócona – stół roboczy podgrzewany do 80-100°C oraz hotend (max 250°C) poruszają się w specyficznym, skompaktowanym układzie. Pole robocze to 180 × 180 × 180 mm przy prędkościach druku sięgających 250 mm/s. Największą zaletą jest możliwość złożenia urządzenia do rozmiarów pudełka po szpuli filamentu. Drukarka jest zasilana zintegrowanym układem 24 V / 200 W, co ułatwia transport, a jej waga oscyluje w granicach 2,3–2,5 kg.

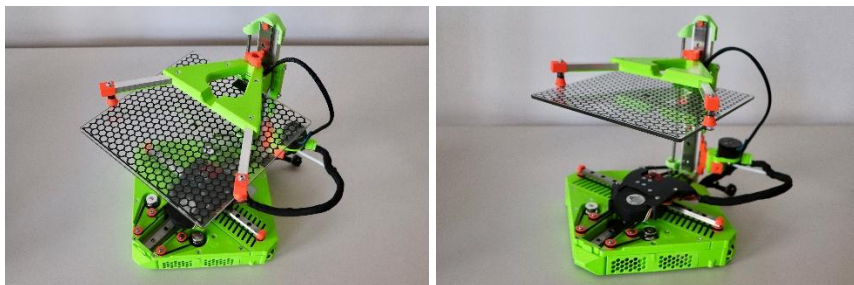


Rysunek 7. Kompaktowa drukarka Positron LT w pozycji transportowej

5.2. Własne modyfikacje i wykorzystanie łatwo dostępnych części

Edukacyjny wymiar tego projektu opiera się na modyfikacjach, które uprościły budowę. Oryginalny projekt zakładał wykorzystanie niszowych i stosunkowo drogich profili Makerbeam oraz części obrabianych mechanicznie (CNC).

W ramach optymalizacji konstrukcji, dokonano gruntownej modyfikacji szkieletu. Profile Makerbeam zostały zastąpione powszechnie dostępnymi, tanimi profilami aluminiowymi w postaci klasycznego ceownika o wymiarach $10 \times 8 \times 1$ mm.



Rysunek 8. Drukarka Positron LT w pozycji roboczej

Zmiana ta z pozoru prosta, wymagała zaawansowanych kompetencji w zakresie CAD:

- Należało przeprojektować większość drukowanych elementów łączących i nośnych, aby dostosować je do nowych, innych wymiarów geometrii ceownika.
- Rozwiązano problem nowego sposobu mocowania w profilach, które nie posiadały rowków montażowych (T-slots).
- Zaprojektowano całkowicie nowy napęd ekstrudera z wahliwym mocowaniem, dostosowując układ mechaniczny podawania filamentu do nowej przestrzeni ramowej.

Dzięki takiemu podejściu uczniowie zdobywają kluczową umiejętność inżynierską: uczą się dostosowywać projekt do materiałów, które są tanie i łatwo dostępne. Budowa urządzenia staje się o wiele prostsza, a sam projekt można powtórzyć w pracowni szkolnej.

6. Wnioski

Przedstawione powyżej trzy studia przypadku dowodzą tezy, iż technologia druku 3D FDM to narzędzie o znacznie szerszym potencjale niż tylko nauka podstawowego modelowania bryłowego.

Wdrażanie w szkolnej pracowni projektów o różnym stopniu skomplikowania pozwala na:

1. **Nauczanie interdyscyplinarne:** model Enigmy łączy w sobie historię, zasady kryptografii, logikę matematyczną oraz kinematykę i budowę maszyn.
2. **Kształtowanie świadomości materiałowej:** projekt narzędzi ogrodowych uczy, jak oceniać wytrzymałość przedmiotów, kiedy warto wybrać mocniejsze tworzywo (PETG zamiast PLA) oraz jak prawidłowo łączyć wydrukowane części z tradycyjnymi, metalowymi.
3. **Rozwój zaawansowanych kompetencji STEM:** przebudowa szkieletu drukarki Positron LT to klasyczny przykład inżynierii wstecznej i optymalizacji kosztowej, łączący mechanikę, elektronikę (24V/200W) oraz programowanie maszyn.

Nauka oparta na rozwiązywaniu prawdziwych problemów (*Problem-Based Learning*), połączona z projektowaniem w programie Autodesk Fusion 360 i drukiem na nowoczesnych drukarkach (np. Bambu Lab), zwiększa zaangażowanie uczniów. Wzięcia do ręki i fizyczne przetestowanie własnoręcznie zaprojektowanego przedmiotu to najlepszy sprawdzian umiejętności. Praktyczne testownie powinno stać się standardem na lekcjach informatyki i techniki, przedmiotów zawodowych na każdym etapie edukacji.

W kontekście dalszego rozwoju zaprezentowanego modelu edukacyjnego, autorzy planują przeprowadzenie ewaluacji skuteczności wdrożenia metodologii *Problem-Based Learning* na większej próbie badawczej uczniów szkół technicznych. Badania te skupią się na ilościowej ocenie przyrostu kompetencji w obszarze algorytmiki i modelowania przestrzennego CAD przy wsparciu narzędzi sztucznej inteligencji (AI), co pozwoli na optymalizację szkolnych programów nauczania w dobie czwartej rewolucji przemysłowej.

Literatura

1. Boratyński T. , Rosienkiewicz M. , Olejarczyk M.: Budowa drukarki 3D RepRap, *Mechanik*, 2011, Tom R. 84, nr 4, Strony 350-352.
2. <https://www.gov.pl/web/laboratoria>.
3. Cornell University, Problem Based Learning, <https://teaching.cornell.edu/teaching-resources/engaging-students/problem-based-learning>.
4. Kaziunas France, A. (2013). *Make: 3D Printing: The Essential Guide to 3D Printers*. Maker Media.
5. Oprogramowanie CAD wykorzystane w procesie badawczym: Autodesk Fusion 360 (Wersja edukacyjna).
6. Repozytorium Thingiverse: Enigma Machine Rotor/Spindle assembly (thing:1813308), modyfikacje własne.
7. Repozytorium Thingiverse: Enigma Rotor Logic Model (thing:3936519).
8. Dokumentacja techniczna drukarek z rodziny RepRap oraz specyfikacja techniczna projektu sprzętowego Positron LT i V3.
9. Wytoczne programowe MEiN (2021) – Program Laboratoria Przyszłości.
10. Owen, J. (2021). *How did the Enigma Machine work?* [Wideo]. YouTube. Dostęp: <https://www.youtube.com/watch?v=ybkkiGtJmkM>.