

Projekt i budowa członu wykonawczego wyświetlacza alfabetu Braille'a z wykorzystaniem materiałów z pamięcią kształtu

Streszczenie

Celem artykułu jest przybliżenie problematyki obecnie dostępnych komercyjnych elektronicznych wyświetlaczy alfabetu Braille'a oraz próba odpowiedzi na pytanie o możliwość wykonania urządzenia o lepszych parametrach w oparciu o stosunkowo nowy rodzaj materiałów, którym są stopy z pamięcią kształtu.

W pierwszej części artykułu poruszono tematykę elektronicznych wyświetlaczy alfabetu Braille'a oraz ich znaczenia w życiu osób niewidomych. W celu uzmysłowienia znaczenia rozwoju technologii dla tej grupy społecznej, przedstawiono na wstępie kilka faktów i danych statystycznych, odzwierciedlających istotę umiejętności czytania i pisania przez niewidomych. Oczywistym pozostaje fakt, że wspomniane zdolności można nabyć i praktykować bez pomocy komputerów. Jednak, podobnie jak w życiu osoby pełnosprawnej, głównym celem wprowadzenia technologii jest usprawnienie procesów, dla których została stworzona. Tym samym w dalszej części skupiono się na opisie obecnie stosowanych wyświetlaczy alfabetu Braille'a, tzw. liniijkach brajlowskich, oraz sposobie ich działania. Autorzy wytypowali wady i zalety komercyjnie dostępnych produktów.

W drugiej części artykułu przedstawiono zaprojektowany model elektronicznego wyświetlacza alfabetu Braille'a. W opracowanej konstrukcji uwzględniono stosunkowo nowy typ materiałów, tj. stopy z pamięcią kształtu [ang. *Shape Memory Alloys*]. W celu wyjaśnienia działania układu mechanicznego przedstawiono opis zastosowanego materiału oraz zjawisk w nim występujących. Następnie rozszerzono dyskusję o zastosowanie opisanych stopów w zaproponowanej konfiguracji. Część pracy poświęcono również na przedstawienie sposobu poszukiwania modeli matematycznych oraz rozwiązania konstrukcyjnego najbardziej interesującego z punktu widzenia potencjalnego użytkownika.

W końcowej części artykułu zaprezentowano wyniki przeprowadzonych eksperymentów na prototypie siłownika punktu Braille'a wykonanym w Katedrze Robotyki i Mechatroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Otrzymane rezultaty zostały pokrótce omówione – autorzy skupili się na aspektach istotnych dla przyszłego rozwoju projektu oraz oczekiwanych korzyści bądź ograniczeń związanych z realizacją dalszych prac.

Kolejne etapy opisanych analiz i prac badawczych autorów zostały docenione przyznaniem pierwszego miejsca w 2. Podsekcji Informatycznej 52. Konferencji Studenckich Kół Naukowych organizowanej w AGH i wyróżnieniem powstałej pracy dyplomowej magisterskiej w XII Ogólnopolskim Konkursie Państwowego Funduszu Rehabilitacji Osób Niepełnosprawnych OTWARTE DRZWI, XVII edycji konkursu na najlepszą pracę dyplomową „DIAMENTY AGH” oraz III Edycji Konkursu Na Najlepsze Prace Dyplomowe Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH.

Słowa kluczowe: linijka brajlowska, alfabet Braille’a, materiały inteligentne, stopy z pamięcią kształtu, materiały piezoelektryczne, martenzyt, austenit

Design and construction of actuator for Braille display applying shape memory materials

Abstract

The paper focuses on the general aspects regarding recently available commercial electronic Braille displays and makes an attempt to answer the question on possible directions for developing more efficient devices applying the relatively new solutions based on shape memory alloys.

First part is devoted to both an overview of available electronic Braille displays and their significance to blind people. To show the relevance of the technological progress for the community of blind people, couple of facts and statistics are provided, which reflect real importance and essence of reading and writing skills. It is obvious that these skills can be achieved and further practiced without any access to computers, however, the mentioned community, as everyone, reasonably demands unlimited access to the current technology and all relevant profits. In the following, the authors present the characteristics of available solutions for electronic Braille displays. The details regarding principle of operation are provided to finally conclude on the advantages and drawbacks of the devices.

Second part of the article introduces the design of electronic actuator’s module for a Braille display, which has been developed by the authors. The presented solution makes use of a shape memory alloy, as an innovative research attempt. A brief description of both the used type of material and observed physical phenomena are provided to explain operation of the proposed solution. Furthermore, the description of mathematical models is given, complemented with the perspectives for a search of improved design configurations.

Final part of the paper summarizes the results of experiments for the prototype of an actuator used to validate the numerical outcomes. The authors focus on further developments and share the conclusions regarding future profits of the project. The test stand was developed in the Department of Robotics and Mechatronics at the AGH University of Science and Technology in Krakow. It is worth to be mentioned, that the subsequent steps of the entire research, including accomplisher master’s thesis, were awarded in the PFRON Competition “OTWARTE DRZWI”, during the XVII edition of annual competition “DIAMONDS of AGH”, in the Faculty of Mechanical

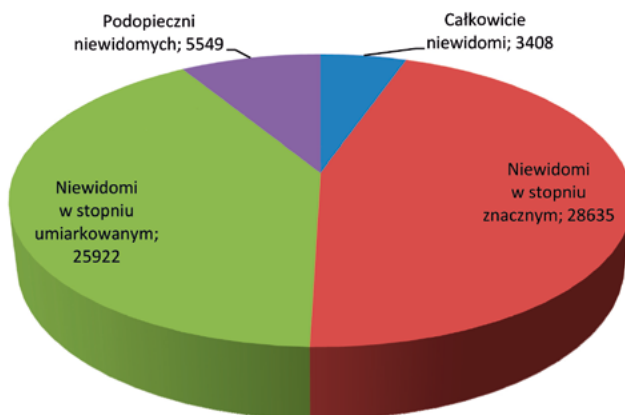
Engineering and Robotics at the AGH-UST and 52 Conference of the Student Special Interest Groups at the AGH-UST.

Keywords: Braille display, Braille alphabet, smart materials, shape memory alloys, piezoelectric materials, martensite, austenite

Wstęp

Zgodnie z informacjami z 2014 r., podanymi przez Światową Organizację Zdrowia, na świecie żyje 285 milionów osób niedowidzących, z czego 35 milionów dotkniętych jest całkowitym brakiem zmysłu wzroku¹. Do Polskiego Związku Niewidomych należy natomiast 63 514 członków, z czego 5% stanowią niewidomi² (Ryc. 1).

Członkowie Polskiego Związku Niewidomych (stan na dzień 21.12.2010 r.)



Ryc. 1. Członkowie PZN²

Źródło: E. Łukasiak, E. Oleksiak, *Osoby niewidome i niedowidzące*, [w:] *Zbiorczy raport z diagnozy świadczonych usług z zakresu rehabilitacji społecznej dla osób niepełnosprawnych w Polsce*, Warszawa, Fundacja im. Stefana Batorego, 2011, s. 5

Ryszard Tadeusiewicz w swoich materiałach dydaktycznych odnosi się do badań naukowych, które dowodzą, że ponad 70% bodźców ze świata zewnętrznego odbierane jest przez człowieka za pomocą zmysłu wzroku³. Mając na uwadze wzrastającą potrzebę przetwarzania informacji w dynamicznie rozwijającym się świecie, wspomniany odsetek zdaje się odzwierciedlać niekwestionowaną wysoką

¹ Zob. *Visual impairment and blindness*, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/en/>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

² Zob. E. Łukasiak, E. Oleksiak, *Osoby niewidome i niedowidzące*, [w:] *Zbiorczy raport z diagnozy świadczonych usług z zakresu rehabilitacji społecznej dla osób niepełnosprawnych w Polsce*, Warszawa, Fundacja im. Stefana Batorego, 2011, s. 5

³ Zob. R. Tadeusiewicz, *Modelowanie systemu wzrokowego*, http://www.uci.agh.edu.pl/uczelnia/tad/Slaidy_z_wykladow_Biocybernetyki_2013/, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

istotność zdolności widzenia. W życiu codziennym coraz większą rolę odgrywają urządzenia elektroniczne pozwalające na szybką wymianę danych. Wciąż pojawiające się na rynku bardziej zaawansowane komputery czy telefony komórkowe całkowicie zrewolucjonizowały sposób komunikowania się oraz gromadzenia i przetwarzania danych, stając się czynnikiem kształtującym obecną kulturę. Obserwowana w ciągu ostatnich dekad ewolucja urządzeń elektronicznych, stanowiących początkowo jedynie proste maszyny obliczeniowe do zaawansowanych narzędzi biurowych czy organizacyjnych, wpłynęła na jakość i szybkość życia, przekształcając nas w społeczeństwo informacyjne. Należy przy tym pamiętać, że to przełomowe wprowadzenie technologii do życia codziennego było możliwe jedynie dzięki zaangażowaniu do transmisji danych najbardziej naturalnego i zaawansowanego zmysłu człowieka, tj. zmysłu wzroku. Idąca za tym zdolność adaptacji nadała prędkość i kierunek rozwoju.

Wspomniany dynamiczny i globalny postęp zaistniał bez uwzględnienia potrzeb i możliwości osób niewidomych. Przyjęty sposób wymiany i przetwarzania danych stał się zatem dodatkowym czynnikiem, mającym wpływ na wykluczenie wspomnianej grupy społecznej z życia publicznego. Zgodnie z informacjami, podanymi w 2009 r. przez PFRON, aż 93% osób niewidomych, a 82% niedowidzących, pozostaje bezrobotna⁴. Przy naporze pesymistycznych danych statystycznych nie można zapomnieć o wysiłku włożonym we włączenie tej grupy w czynny udział w życiu publicznym.

Dlaczego pismo odgrywa tak znaczącą rolę?

Wraz z popularyzacją przenośnych odtwarzaczy audio wzrosła popularność tzw. audiobooków, tj. tekstów czytanych przez profesjonalnych lektorów. Tym samym powiększyła się znacząco liczba opracowań, mogąca zostać przyswojona przez osoby niewidome, otwierając przed nimi nowe możliwości. Zastąpienie zmysłu wzroku przez słuch wydaje się być idealnym rozwiązaniem problemu. Co więcej, niejednokrotnie osoby pełnosprawne świadomie wybierają wspomnianą opcję, rezygnując z tradycyjnej książki. Niestety, jak wykazują badania, słuchanie nie jest w stanie zastąpić czytania. Dokładniej rzecz ujmując, nie jest tak efektywne jak czytanie. Idealny przykład stanowią tabele czy wykresy, których prezentacja słowna nie daje ogólnego rozeznania zawartej w nich treści. Dla wybranych przypadków niezastąpiona jest reprezentacja pisemna. Ponadto naukowcy udowadniają wymierne korzyści czytania podczas nauki gramatyki, języków, matematyki czy przedmiotów ścisłych⁵.

⁴ Zob. M. Grzymkowska, *Aktywność zawodowa osób niewidomych – najważniejsze dane*, <http://watchdogpfron.pl/aktywnosc-zawodowa-osob-niewidomych-najwazniejsze-dane/>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

⁵ Zob. *Center for Braille Innovation. Leveraging Braille Technology for Future Generations*, <http://www.nbp.org/downloads/cbi/NBP-CBI-Wt-Paper.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

Najbardziej dobitne dowody słuszności powyższych stwierdzeń pochodzą z danych statystycznych zebranych w Stanach Zjednoczonych. Mianowicie na 26% osób niewidomych, które podjęły pracę, aż 90% potrafi posługiwać się metodą Braille'a. Zatem można stwierdzić, że bezpośrednio z umiejętnością czytania wzrasta prawdopodobieństwo uzyskania niezależności finansowej. Fakt ten jest istotny zarówno dla osób dotkniętych opisywaną niepełnosprawnością, jak również dla całego społeczeństwa. Według przytoczonych danych Stany Zjednoczone notują rocznie spadek wydajności produkcyjnej w wysokości około 8 miliardów dolarów z powodu braku aktywności zawodowej osób niewidomych.

Pomimo wykazanych korzyści, w USA odnotowano w ciągu 40 lat spadek liczby osób niewidomych potrafiących czytać z 50% do 12%. Za powód tego stanu rzeczy uważa się głównie wspomniany wzrost popularności plików audio.

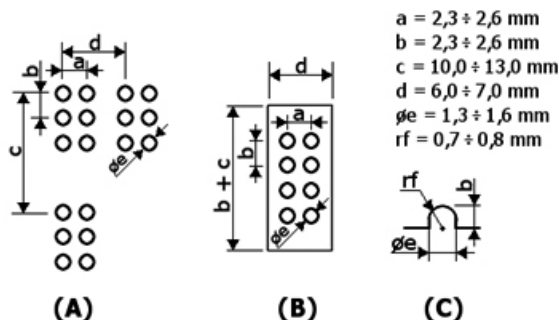
Metoda Braille'a

W powyższej części artykułu wspomniano kilkakrotnie o umiejętności czytania przez osoby niewidome. Proces ten odbywa się poprzez zaangażowanie zmysłu dotyku. Za pierwszą skuteczną, stosowaną do tej pory metodę, uważa się system Braille'a wynaleziony przez piętnastoletniego ucznia, Louisa Braille'a. Swoją pracę oparł na metodzie służącej pierwotnie do wymiany informacji pomiędzy żołnierzami w zupełnej ciemności. Sukces pomysłu polegał na zastąpieniu wytłoczeń w kształcie liter wypukłymi punktami⁶.

Początkowo jeden znak reprezentowany był przez sześć kropek, ułożonych w dwie kolumny i trzy wiersze. Z biegiem czasu metoda doczekała się rozwiniętej formy, w której jednej literze odpowiada osiem punktów, rozmieszczonych odpowiednio w dwóch kolumnach i czterech wierszach. Obie wersje stosowane są po dziś dzień, jednakże w formie papierowej chętniej używana jest postać podstawowa, a w urządzeniach cyfrowych rozszerzona. Wymiary punktów oraz odległości pomiędzy nimi nie zostały dokładnie określone, jednak wprowadza się pewne typowe ograniczenia geometryczne, operujące stosunkowo wąskimi zakresami. Standardowe zależności geometryczne dla obu wersji metody przedstawiono na Ryc. 2.

W tym miejscu należy wspomnieć o przyczynie powstania wersji rozszerzonej metody Braille'a. Zapis znaku w tym systemie odbywa się poprzez wytłoczenie odpowiednich punktów – w miejsce pozostałych, tj. niewytłoczonych, pozostaje płaska powierzchnia. Tym samym wzajemna kombinacja i rozmieszczenie ośmiu kropek umożliwia prezentację 256 symboli. W porównaniu do 64 różnych konfiguracji w wersji standardowej, uzyskuje się większą wszechstronność i możliwość zapisu tekstu różnymi odmianami metody Braille'a. Z tego też względu system ośmiopunktowy jest chętniej stosowany w urządzeniach cyfrowych, natomiast w formie papierowej uważa się za wystarczającą notację sześciopunktową.

⁶ Zob. *Louis Braille*, <http://www.nbp.org/ic/nbp/braille/whoislois.html>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]



Ryc. 2. Zmienne i ich wartości, opisujące wymiary charakterystyczne znaku tworzącego dla: (A) metody sześciopunktowej; (B) metody ośmiopunktowej; (C) przekroju punktu Braille’a

Źródło: S. Anshul, J. Pranay, C. Piyush i in., *Application of Shape Memory Alloy (SMA) based actuation for refreshable display of Braille*, Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Portland, Oregon, USA, 4–7.08.2013, s. 1–8

Metoda Braille’a stanowi milowy krok dla osób niewidomych w dostępie do informacji. Od początków jej powstania wiązała się z tłumaczeniem tekstu do postaci punktów wytłaczanych na papierze. Pomimo niewątpliwego przełomu, który udało się dzięki niej uzyskać, nie sposób nie zauważyć jej wad. Długi czas potrzebny na przetłumaczenie tekstu, jak również jego znaczne rozmiary, powodują spore ograniczenia w dostępności źródeł dla szerszego grona odbiorców. Skalę problemu przedstawiono na Ryc. 3. Zamieszczone zdjęcie prezentuje dwa identyczne czasopisma, jedno zapisane tradycyjną metodą dla osób pełnosprawnych, drugie przetłumaczone na system Braille’a.



Ryc. 3. Zdjęcie dwóch wersji czasopisma „Krakowski Semestralnik Studentów Niepełnosprawnych”, zapisanego tradycyjnym alfabetem polskim oraz przetłumaczonego na system Braille’a

Źródło: opracowanie własne

Wraz z rozwojem technologii i podążającą miniaturyzacją postawiono nowy cel, którym było zaprojektowanie i wykonanie elektronicznego wyświetlacza alfabetu Braille'a. Jego główną zaletą miało być usunięcie wad związanych z papierową prezentacją tekstu poprzez automatyczne tłumaczenie treści zapisanej w formacie cyfrowym oraz uzyskaną mobilność, poprzez zastąpienie obszernych tomów małymi wyświetlaczami, wyposażonymi w cyklicznie pracujące siłowniki.

Linijki brajlowskie

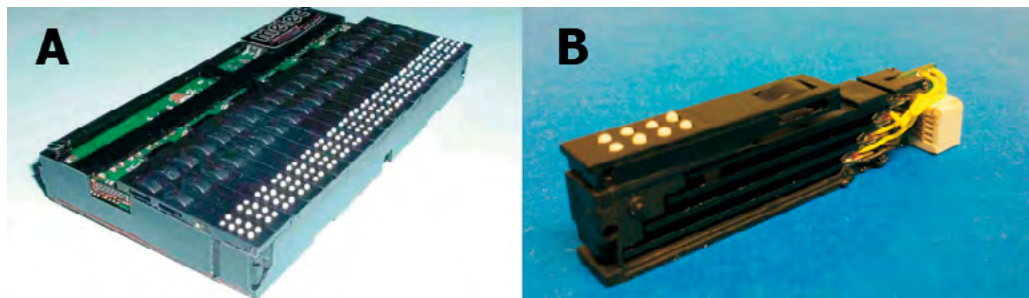
Wymagania dotyczące zagęszczenia liczby siłowników na jednostkę powierzchni szybko nadały kierunek rozwoju elektronicznym wyświetlaczom alfabetu Braille'a. Typowa strona zapisana omawianą techniką ma wymiary 28 na 30 cm, mieszcząc 25 wierszy po 40 znaków⁷. Tym samym, w zależności od wybranej wersji systemu Braille'a, na jeden arkusz papieru przypada od 6 000 do 8 000 punktów. Typowe rozwiązania nie spełniają jednak powyższych wymagań, co znacząco wpłynęło na szybkość rozwoju wyświetlaczy alfabetu Braille'a. Zastosowanie silników elektrycznych w dostępnej przestrzeni jest praktycznie niemożliwe, natomiast urządzenia oparte na siłownikach pneumatycznych były pokaźnych rozmiarów i w dodatku zbyt głośne. Dodatkowo należy mieć na uwadze, że wraz z malejącymi wymiarami urządzenia ta sama liczba ruchomych podzespołów wpływa na zwiększoną awaryjność układu.

Rozwiązaniem okazały się nowe materiały, zwane materiałami inteligentnymi [ang. *smart materials*]. Swoją nazwę zawdzięczają możliwości sterowania ich wybranymi własnościami, czy też ich bezpośrednim odkształceniem, bez zastosowania wymuszenia siłowego. Dynamiczny rozwój wspomnianej grupy materiałów w ciągu ostatnich dekad otworzył nowe możliwości przed projektantami. Na rynku pojawiły się pierwsze modele urządzeń dostępne dla szerokiego grona odbiorców.

Obecnie większość, jeśli nie wszystkie, komercyjnie dostępne wyświetlacze alfabetu Braille'a bazują na napędach wykonanych w oparciu o materiały piezoelektryczne, stanowiące pokaźną podgrupę materiałów inteligentnych. Ich szczególne własności polegają m.in. na generacji pola elektrycznego na skutek odkształcenia próbki. Ta cecha materiału nosi nazwę efektu piezoelektrycznego prostego. Dodatkowo charakteryzują się zjawiskiem odwrotnym, tzn. odkształcanie elementu zachodzi na skutek działania zewnętrznego pola elektrycznego stanowiącego tym samym czynnik aktywacyjny dla budowanego modułu napędowego. Typowy moduł wyświetlacza alfabetu Braille'a, bazujący na materiałach piezoelektrycznych, przedstawiono na Ryc. 4. Przedstawione urządzenia są

⁷ Zob. Y. Bar-Cohen, *Dynamic Braille*, <http://www.nbp.org/downloads/cbi/DynamicBraille.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

produktami niemieckiej firmy Metec, z której oferty skorzystano m.in. w nagrodzonym w 2013 r. projekcie „Smartphone dla niewidomych”⁸.



Ryc. 4. Najnowsze rozwiązania firmy Metec: A. jednowierszowy 20-znakowy wyświetlacz alfabetu Braille’a; B. moduł pojedynczego znaku tworzącego

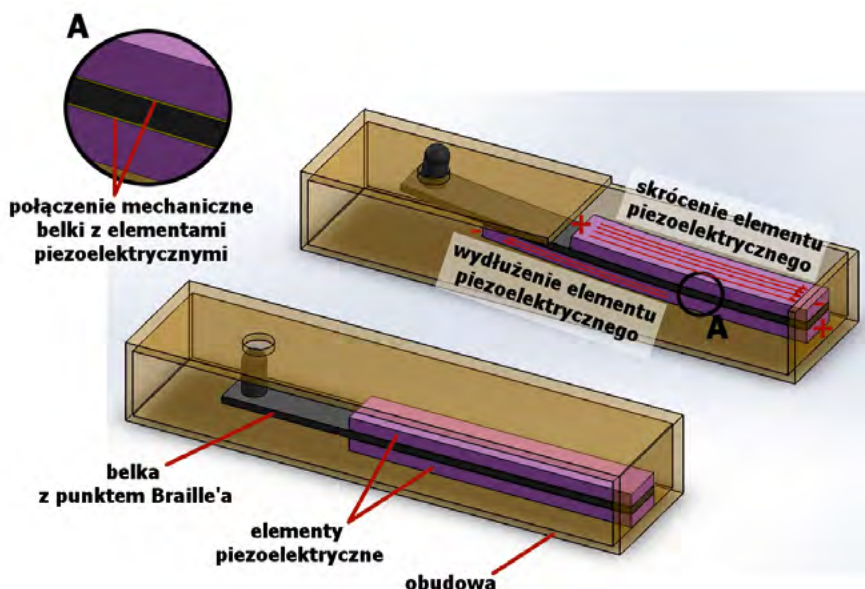
Źródło: <http://web.metec-ag.de/products.html>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

Elementy układów napędowych wykonane z materiałów piezoelektrycznych ulegają skróceniu bądź wydłużeniu, w zależności od znaku potencjału sterującego pola elektrycznego. W celu minimalizacji wysokości urządzenia, do budowy jednego punktu Braille’a wykorzystano dwa elementy wykonane z omawianego materiału inteligentnego. Taka konfiguracja powoduje w efekcie zginanie się całego zespołu, mimo że pojedyncze elementy w dalszym ciągu poddawane są jedynie ścisaniu bądź rozciąganiu. Proces można wyjaśnić za pomocą teorii wytrzymałości materiałów, a dokładniej opisu zjawiska tzw. czystego zginania⁹. Zasadę działania układu przedstawiono schematycznie na Ryc. 5. Ostatecznie omawiany zestaw podzespołów tworzących znak Braille’a pozwala na ich instalację w pozycji poziomej w stosunku do płaszczyzny urządzenia, uzyskując przy tym żądany skok punktu (Ryc. 2c, zmienna b). Taka konfiguracja niekorzystnie wpływa na szerokość finalnego urządzenia, jednak ogranicza jego wysokość, nadając wyświetlaczowi większą poręczność podczas użytkowania.

Przedstawione rozwiązanie, stosowane w przeważającej większości wyświetlaczy, niesie za sobą pewne ograniczenia. Otóż gabaryty modułu pojedynczego znaku Braille’a nie pozwalają na tworzenie urządzeń o większej liczbie wierszy niż dwa. Należy jednak pamiętać, że rzadko spotykane są wyświetlacze inne niż jednowierszowe, przede wszystkim ze względu na i tak wysoką cenę opisywanego rozwiązania.

⁸ Zob. R. Dhambarage, S. Wijayarathne, D. Weerakkody i in., *Braille to go Smartphone*, <http://www.nbp.org/downloads/cbi/brailletogsmartphone.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

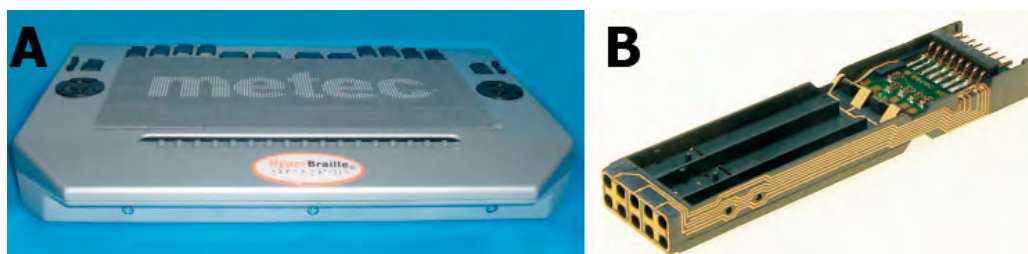
⁹ Zob. A. Skorupa, M. Skorupa, *Wytrzymałość materiałów*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2000, s. 101–107



Ryc. 5. Zasada działania siłownika punktu Braille'a opartego na bazie pary elementów piezoelektrycznych

Źródło: opracowanie własne

Problem ograniczonego miejsca na instalację modułów dla kolejnych linii tekstu można, oczywiście, rozwiązać poprzez zastosowanie jednoelementowego napędu piezoelektrycznego dla znaku Braille'a, gdzie skok siłownika byłby realizowany poprzez wydłużenie bądź skrócenie komponentu z materiału inteligentnego, zamiast zginania jego zespołu. Wiąże się to jednak ze znacznym wzrostem wysokości urządzenia, a – co za tym idzie – utratą jego mobilności. Mimo to również takie rozwiązania pojawiły się na rynku. Na Ryc. 6 przedstawiono wersję graficzną wyświetlacza firmy Metec⁸, składającego się z 7 200 punktów Braille'a. Produkt jest 4-krotnie wyższy od poprzednio przedstawionego, osiągając wartość 60 mm.



Ryc. 6. Graficzny wyświetlacz alfabetu Braille'a firmy Metec: A. zdjęcie gotowego produktu; B. zdjęcie modułu dziesięciu punktów Braille'a

Źródło: <http://web.metec-ag.de/products.html>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

W Polsce wspomniane urządzenia przyjęły się pod nazwą linijek brajlowskich. Pomimo bogatej oferty, dostępnej również na rodzimym rynku, podstawowe ograniczenie w użytkowaniu stanowi cena. Koszt jednowierszowego wyświetlacza waha się, w zależności od ilości znaków tworzących, od 7 000 do prawie 40 000 złotych¹⁰, co stanowi barierę nie do pokonania dla większości potencjalnych użytkowników. Mając na uwadze obecne ceny oraz wymiary modułów komercyjnych produktów, stale poszukiwane są lepsze oraz tańsze rozwiązania.

Materiały z pamięcią kształtu

Tak, jak wspomniano, projekty oparte na typowych rozwiązaniach skutecznie zostały zastąpione przez innowacyjne, oparte w głównej mierze na materiałach inteligentnych. O ile napędy piezoelektryczne skutecznie zdominowały rynek linijek brajlowskich, wszystko wskazuje na to, że na dłuższy okres osiągnęły one maksimum swoich możliwości. Pokonanie obecnych barier wymagałoby odkrycia materiału o korzystniejszych własnościach.

Duże nadzieje na dalszy rozwój wyświetlaczy wiązane są z polimerami elektroaktywnymi. Niestety, na etapie obecnie realizowanych eksperymentów, materiały te wykazują jeszcze zbyt dużą niestabilność. Dodatkowo, przeprowadzone testy są zbyt krótkie, aby można było przewidzieć długość życia siłowników opartych na wspomnianym tworzywie¹¹. Jednakże osiągnięcie sukcesu może wpłynąć na dynamiczny postęp, nie tylko na rynku elektronicznych wyświetlaczy alfabetu Braille'a.

Istnieje trzecia interesująca grupa materiałów inteligentnych, charakteryzująca się zmianą kształtu w fazach stałych poprzez reorganizację atomów w sieci krystalicznej – materiały z pamięcią kształtu. Efekt ten jest zazwyczaj generowany termicznie, a przez to, że materiały należące do tej grupy wykazują dobre własności przewodnictwa elektrycznego, ogrzewanie realizuje się często poprzez bezpośredni przepływ prądu. Podstawowym rodzajem materiałów z pamięcią kształtu są stopy metali, od czego zawdzięczają swoją nazwę [ang. *Shape Memory Alloy* – SMA]. Polski, jak również angielski termin, odnoszą się także do ich głównej własności, tj. możliwości powrotu do zapamiętanego kształtu po przekroczeniu charakterystycznej temperatury. Z tą unikatową cechą materiałów z pamięcią kształtu związane są trzy zjawiska:

1. Jednokierunkowy efekt pamięci kształtu – w celu jego zaobserwowania należy na wstępie odkształcić element plastycznie, tzn. zadziałać takim obciążeniem (siłą), aby po jego usunięciu komponent wykonany z SMA nie

¹⁰ Zob. *Oferta firmy P. H. U. Impuls*, http://www.phuimpuls.pl/?monitory_brajlowskie,44,2, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

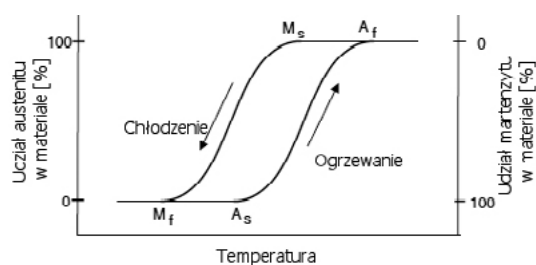
¹¹ Zob. K. Yusaku, S. Tsuyoshi, T. Makoto i in., *Sheet-type Braille displays by intergrating organic field-effect transistors and polymeric actuators*, „IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES” 2007, Nr 2(54), s. 202–209

wrócił do swojego pierwotnego kształtu – przy obecności tzw. odkształceń resztkowych. W celu powrotu do początkowej formy należy podgrzać próbkę powyżej charakterystycznej temperatury.

2. Dwukierunkowy efekt pamięci kształtu – oprócz zjawisk opisanych dla wcześniejszego przypadku, zmiana kształtu występuje także po ochłodzeniu komponentu. Mówiąc potocznie, element zapamiętuje dwa charakterystyczne kształty. Dzięki temu nie ma potrzeby przykładania zewnętrznego obciążenia – w obu przypadkach czynnikiem wymuszającym przemianę jest zmiana temperatury.
3. Pseudosprężystość (supersprężystość) – efekt objawia się w przypadku, gdy na element poddany działaniu temperatury w określonym zakresie działa obciążenie mechaniczne, powodujące odkształcenia resztkowe. Z powodu specyficznych własności otoczenia (precyzując – specyficznej temperatury), w których znajduje się materiał, po usunięciu wymuszenia obserwuje się powrót komponentu do pierwotnego kształtu. Tym samym nie występuje trwała deformacja elementu. W przeciwieństwie do dwóch powyżej opisanych zjawisk, efekt supersprężystości zachodzi bez udziału procesów termicznych, tzn. bez konieczności zmiany temperatury próbki.

W celu zrozumienia zjawisk fizycznych, odpowiadających za wystąpienie charakterystycznego zachowania materiałów z pamięcią kształtu, należy zapoznać się z ich strukturą wewnętrzną. Tak jak każdy metal, są one zbudowane z uporządkowanej sieci krystalicznej, charakteryzującej się szczególnym ułożeniem atomów bądź cząsteczek substancji. Siły działające w skali nano wpływają na uporządkowaną strukturę materiału. Sekret omawianej grupy stopów polega na określonej zmianie tej struktury

w zależności od temperatury, w jakiej się znajdują. I tak, w niskiej temperaturze komponent składa się w całości z fazy (struktury) martenzytu, a przy ogrzaniu powyżej charakterystycznej wartości przemienia się w austenit. Zjawisko to, opisane charakterystyką przedstawioną na Ryc. 7, nosi nazwę przemiany martenzytycznej i stanowi podstawę wszystkich przedstawionych efektów¹².



Ryc. 7. Przemiana martenzytyczna: udział poszczególnych faz materiałowych w zależności od temperatury

Źródło: Y. Harn Teh, *Fast, accurate force and position control of shape memory alloy actuators*, <http://royfeatherstone.org/SMA/YHTthesis.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

¹² Zob. Y. Harn Teh, *Fast, accurate force and position control of shape memory alloy actuators*, <http://royfeatherstone.org/SMA/YHTthesis.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

Ponadto martenzyt może występować w dwóch postaciach: bliźniaczej i niezbliźniaczonej. Przekroczenie pewnej granicy naprężeń powoduje przemianę pierwszego w drugi. Omawianą sytuację w postaci zależności naprężenia od odkształcenia przedstawiono na Ryc. 8. Należy zwrócić uwagę, że zarówno martenzyt nieodkształcony (bliźniaczy), jak i odkształcony (niezbliźniaczony) poddawane są początkowo odkształceniom sprężystym (odpowiednio krzywa 1, 3), a następnie plastycznym (odpowiednio krzywa 2, 4).

Przedstawiony opis jest wystarczający do zrozumienia jednokierunkowego i dwukierunkowego efektu pamięci kształtu. Podsumowując wstęp teoretyczny o danej grupie materiałów inteligentnych na Ryc. 9 przedstawiono uproszczony dwuwymiarowy schemat przemiany struktury krystalicznej dla pierwszego omawianego zjawiska.

Od strony analitycznej i projektowej więcej informacji na temat zachowania SMA dostarcza krzywa zależności naprężenia – odkształcenia – temperatury, na podstawie której można oszacować wartości charakterystyczne poszczególnych stopów. Przykład takiego wykresu zamieszczono na Ryc. 10.

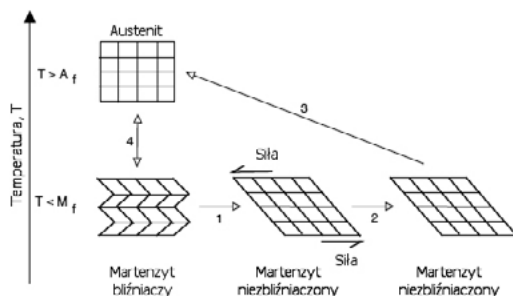
Ryc. 10. Krzywa zależności naprężenia – odkształcenia – temperatury dla jednokierunkowego efektu pamięci kształtu

Źródło: Y. Harn Teh, *Fast, accurate force and position control of shape memory alloy actuators*, <http://royfeatherstone.org/SMA/YHTthesis.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]



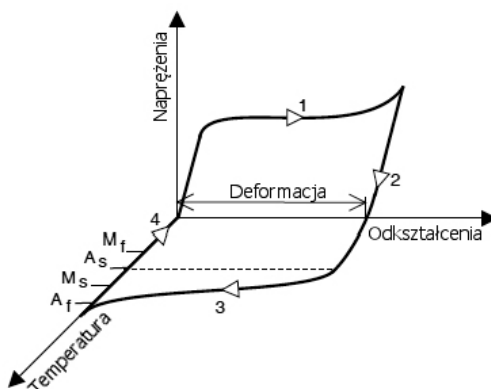
Ryc. 8. Krzywa rozciągania dla stopu o strukturze martenzytu

Źródło: Y. Harn Teh, *Fast, accurate force and position control of shape memory alloy actuators*, <http://royfeatherstone.org/SMA/YHTthesis.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]



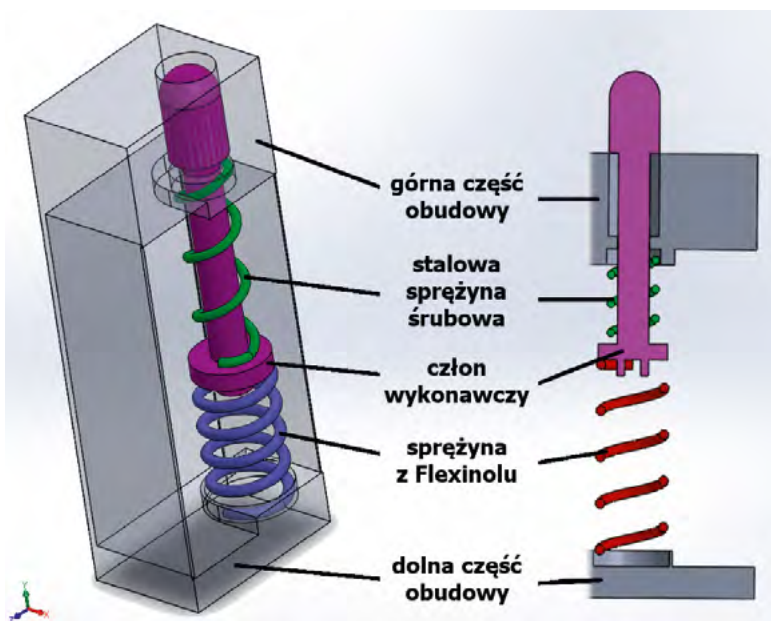
Ryc. 9. Uproszczony dwuwymiarowy schemat struktury krystalicznej dla jednokierunkowego efektu pamięci kształtu

Źródło: Y. Harn Teh, *Fast, accurate force and position control of shape memory alloy actuators*, <http://royfeatherstone.org/SMA/YHTthesis.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]



Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu w projekcie elektronicznego wyświetlacza alfabetu Braille'a

Sama zmiana struktury wewnętrznej materiału z pamięcią kształtu w trakcie przemiany martenzytycznej nie byłaby tak istotna, gdyby nie zachodzące w elemencie zmiany wartości parametrów materiałowych. Martenzyt w stosunku do austenitu charakteryzuje się znacznie większą podatnością na odkształcenia. To właśnie ta własność materiałów z pamięcią kształtu pozwoliła na wykorzystanie ich w pracy nad elektronicznym wyświetlaczem alfabetu Braille'a. Na Ryc. 11 przedstawiono model zaprojektowanego układu mechanicznego siłownika pojedynczego punktu.



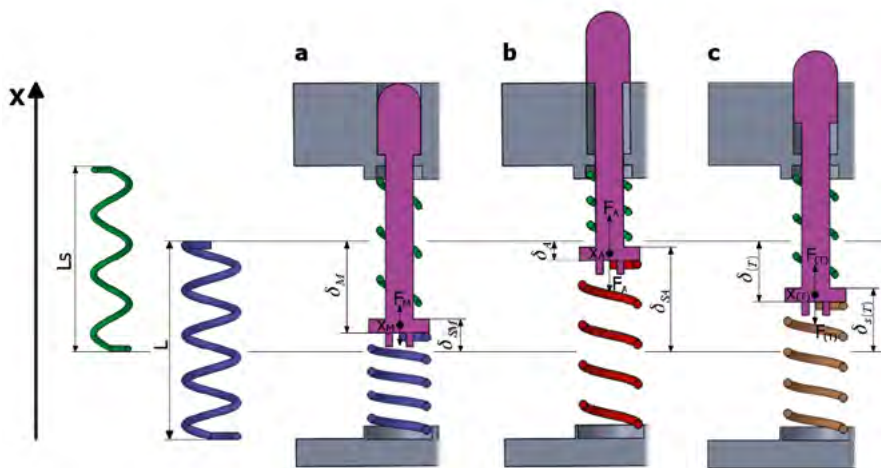
Ryc. 11. Model (po lewej) oraz przekrój (po prawej) układu mechanicznego siłownika punktu Braille'a

Źródło: opracowanie własne

Materiały z pamięcią kształtu standardowo sprzedawane są w postaci drutu. Mając to na uwadze, w projekcie postanowiono uformować elementy w sprężyny. Ich główną zaletą jest zdolność do znacznych odkształceń występujących pod wpływem działającego obciążenia. Zaproponowana konstrukcja pozwala tym samym uzyskać wymagany skok punktu Braille'a przy zachowaniu jak najmniejszej wysokości urządzenia.

Zaproponowany model siłownika składa się z dwóch sprężyn wykonanych odpowiednio ze stali oraz materiału z pamięcią kształtu, członu wykonawczego

(punktu Braille'a) i obudowy. Poszczególne części zaprojektowano w taki sposób, aby ewentualne odchyłki parametrów, występujące w rzeczywistych elementach, nie miały wpływu na poprawne działanie systemu. Należy bowiem uwzględnić zawsze występujące pewne niedokładności podczas obróbki mechanicznej, czy też przy wytwarzaniu materiału, których nie da się do końca przewidzieć w początkowym stadium projektu, a tym samym uwzględnić w modelach matematycznych.



Ryc. 12. Wyróżnione pozycje siłownika: a. punkt Braille'a nieaktywny; b. punkt Braille'a aktywny; c. położenie pośrednie punktu Braille'a. Po lewej stronie ilustracji przedstawiono obie sprężyny w stanie swobodnym, tzn. gdy nie działają na nie żadne obciążenia

Źródło: opracowanie własne

Warto odnotować, że w powyższym modelu wykorzystano jedynie zjawisko przemiany martenzytycznej, której zajście gwarantuje skok siłownika o wymaganej wartości (zmienna b , Ryc. 2). Na Ryc. 12 przedstawiono cykl pracy prezentowanego układu mechanicznego. Po lewej stronie ilustracji przedstawiono obie sprężyny w stanie swobodnym, tzn. gdy nie działają na nie żadne obciążenia. Wysokość wewnętrzna obudowy jest mniejsza od sumy długości obu elementów, przez co już na wstępie są odkształcone. Stopień skrócenia sprężyn zależy od ich własności materiałowych. W niskiej temperaturze sprężyna z materiału z pamięcią kształtu jest bardziej podatna na odkształcenia, w efekcie czego wierzchołek punktu Braille'a znajduje się na równi z górną powierzchnią obudowy (Ryc. 12a). Podgrzanie dolnego elementu poprzez przepływający przez niego prąd elektryczny inicjalizuje przemianę martenzytyczną. Wraz z pojawianiem się austenitu, powstającego w miejsce martenzytu, zwiększa się sztywność komponentu wykonanego z SMA. Oznacza to, że ten element jest mniej podatny na odkształcenia, a co za tym idzie, większa siła reakcji przeciwstawia się zmianom pierwotnego

kształtu. W trakcie podgrzewania w materiale występują jednocześnie obie fazy, tj. martenzyt i austenit, zgodnie z wykresem zaprezentowanym na Ryc. 7. Ten etap pracy siłownika przedstawiono na Ryc. 12c. Ostatecznie przekroczenie temperatury charakterystycznej powoduje występowanie w elemencie jedynie fazy wysokotemperaturowej (austenitu). W tej sytuacji obserwowany jest maksymalny skok siłownika, co zaprezentowano na Ryc. 12b. Ochłodzenie materiału prowadzi do odwrotnej sytuacji, tzn. przemiany austenitu w martenzyt, zamykając tym samym cykl pracy układu.

W zależności od dobranych wymiarów poszczególnych komponentów układu uzyskuje się różne wartości parametrów siłownika, takich jak maksymalny skok punktu Braille'a czy jego podatność na siłę nacisku palca przesuwanego po powierzchni urządzenia. Warto w tym miejscu wspomnieć, że zgodnie z przeprowadzonymi badaniami, siła reakcji członu wykonawczego na obciążenie od strony użytkownika powinna wynosić 0,3 N. Innymi słowy, nie można dopuścić do zmiany stanu punktu Braille'a w trakcie odczytu jego pozycji przez osobę niewidomą. W obecnych komercyjnych produktach wartość ta jest niższa od preferowanej i wynosi ok. 0,12 N⁶.

W celu wyznaczenia charakterystyki przemieszczenia punktu Braille'a od temperatury poszukiwany jest warunek równowagi sił dla przypadków zamieszczonych na Ryc. 12. Dzięki rozwiązaniu układu dwóch równań równowagi sił mechanicznych dla stanu aktywnego i nieaktywnego punktu Braille'a określany jest maksymalny skok siłownika. Przy odpowiednim przekształceniu równań możliwe byłoby wyznaczenie żądanej wysokości urządzenia dla oczekiwanego przemieszczenia wierzchołka członu wykonawczego przy zadanych parametrach sprężyn. Niestety, problem nie jest trywialny. Oprócz konkretnej wartości maksymalnego skoku siłownika, oczekuje się rozwiązania zapewniającego minimalną wysokość urządzenia, czy minimalne odchylenie punktu od nominalnego położenia na skutek przyłożonej siły przez osobę niewidomą. Nie można również zapomnieć o kwestiach ekonomicznych. Konkretna konfiguracja powinna zapewnić jak najmniejsze zużycie drogich materiałów z pamięcią kształtu. Powyższe kwestie sprawiają, że niemożliwe jest wskazanie optymalnego rozwiązania dla poszczególnych problemów poprzez uproszczenie sformułowanego układu równań. Ostatecznie zastosowano algorytmy genetyczne w poszukiwaniu interesujących konfiguracji projektowych.

Algorytmy genetyczne

Zasada działania algorytmów genetycznych oparta jest na zjawisku ewolucji zachodzącej w przyrodzie. Konfiguracje zmiennych decyzyjnych w zadaniu projektowym kodowane są w postaci tzw. osobników, które w kolejnych generacjach poddawane operacjom krzyżowania i mutacji, zostają następnie oceniane pod

względem przystosowania. Innymi słowy, sprawdzana jest przydatność osobników w rozwiązaniu zadanego problemu. W zależności od wyników, procedura może zostać zakończona, jeśli stwierdzono zadowalające efekty lub proces jest kontynuowany. W drugim przypadku osobnicy biorą udział w tworzeniu nowej generacji.

Stosowane w naukach przyrodniczych terminy, takie jak „gen”, „populacja” czy „chromosom”, zostały zapożyczone do opisu elementów algorytmów genetycznych. Tym samym chromosom (osobnik) oznacza jeden z możliwych wariantów odpowiedzi. Poszczególne parametry rozwiązania zapisane są za pomocą genów, tzn. zakodowanych wartości liczbowych. W omawianym problemie siłownika punktu Braille’a osobnik definiuje zbiór parametrów sprężyny wykonanej z materiału z pamięcią kształtu, kodujących odpowiednio:

- średnicę sprężyny;
- średnicę drutu, z którego sprężyna została zwinięta;
- kąt wzniosu linii śrubowej.

Tak, jak wspomniano, poszczególne parametry są zakodowane – występują w postaci ciągu liczb w formie binarnej. Chromosom osobnika (sprężyny) składa się z 10 bitów:

- trzy pierwsze geny (bity) odpowiadają rozróżnieniu ośmiu ($2^3=8$) różnych wartości średnicy drutu;
- pięć kolejnych bitów pozwala na rozróżnienie trzydziestu dwóch ($2^5=32$) wartości średnicy sprężyny;
- dwa ostatnie służą do wyboru jednej z czterech ($2^2=4$) różnych wartości kąta wzniosu linii śrubowej.

Dla określonej liczby osobników w populacji losuje się wartości parametrów ze zdefiniowanego zakresu oraz sprawdza się ich przystosowanie. Innymi słowy, podstawia się odkodowane wielkości determinujące własności sprężyny do wyznaczonego układu równań i weryfikuje się, czy rozwiązanie zachowuje sens fizyczny. Jeśli rozwiązanie jest dopuszczalne, odkodowane wartości zostają podstawione do funkcji przystosowania. Zależność ta zdefiniowana jest w taki sposób, aby określała atrakcyjność rozwiązania, poprzez pośrednie określenie wysokości urządzenia czy oporu siłownika na obciążenie zewnętrzne. W przypadku braku zadowalającego rozwiązania, w sposób losowy wybiera się osobników, których geny zostaną skrzyżowane w celu utworzenia nowej populacji. Proces ten zazwyczaj implementowany jest w taki sposób, aby największe szanse na dziedziczenie miały najlepiej dopasowane chromosomy. Schemat algorytmu genetycznego przedstawiono na Ryc. 13¹³.

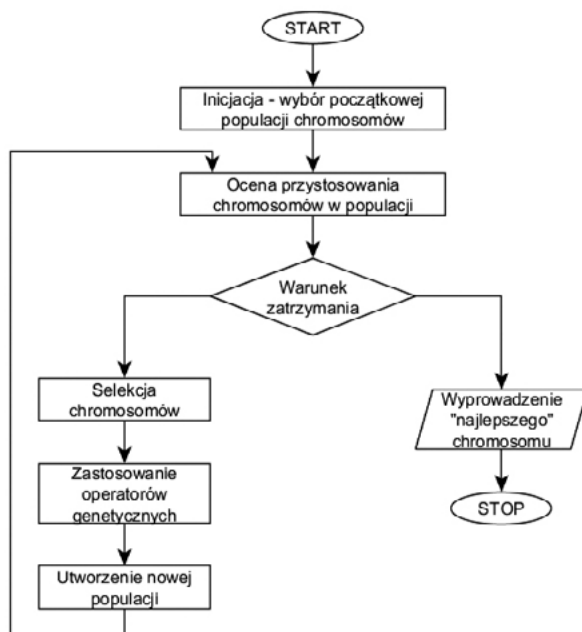
¹³ Zob. L. Rutkowski, *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 2012

Metoda została zaimplementowana w środowisku obliczeniowym MATLAB. Na Ryc. 14 przedstawiono histogram z tysiąca wywołań algorytmu, przy czym każde z nich obejmowało sto generacji z uwzględnieniem dwudziestu czterech osobników w populacji.

Maksymalna możliwa do osiągnięcia wartość funkcji przystosowania wynosiła 100. Dla największej liczby wywołań osiągnęła wartość 94,4. Wszystkie pozostałe wyniki, poza dwoma, znajdowały się blisko wspomnianej wielkości. Niewielkie różnice wartości funkcji przystosowania dla poszczególnych wywołań spowodowane były niewielkimi różnicami średnic wybranych sprężyn. Dla pozostałych dwóch zdefiniowanych parametrów otrzymano identyczne wielkości dla każdego z tysiąca wyników, co utwierdziło autorów w przekonaniu, że znalezione rozwiązanie konstrukcyjne jest stosunkowo bliskie rozwiązaniu optymalnemu. Dla najlepszego zestawienia par sprężyn ich łączna wysokość po zamontowaniu w obudowie wyniosła 31 mm.

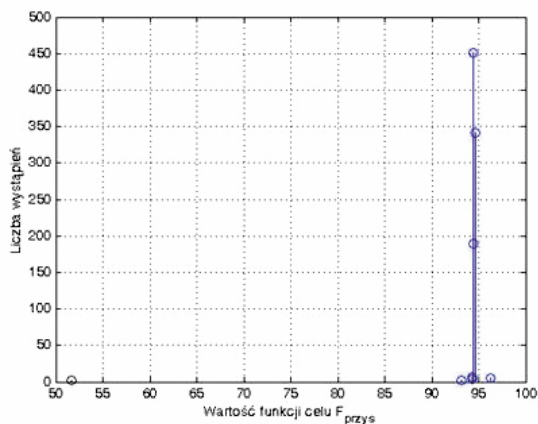
Prototyp

Po uzyskaniu poprawnych wyników podjęto próbę walidacji przeprowadzonych obliczeń poprzez budowę prototypu. Ze względu na specyficzne wymiary sprężyny stalowej, jak również wymagania co do czasu realizacji zadania, postanowiono



Ryc. 13. Schemat algorytmu genetycznego

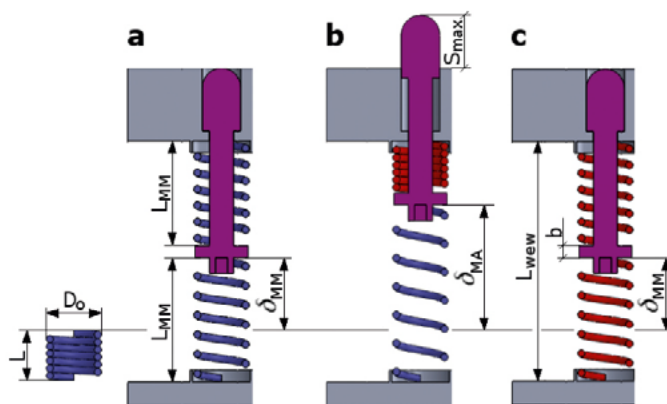
Źródło: L. Rutkowski, *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 2012



Ryc. 14. Histogram z tysiąca wywołań algorytmu genetycznego

Źródło: opracowanie własne

zrezygnować z tego komponentu, zastępując go drugim elementem z materiału inteligentnego. Kolejna zmiana była podyktowana sposobem prowadzenia treningu, tj. nauki żądanego kształtu. Tym samym zrezygnowano ze sprężyn naciskowych na rzecz naciągowych. Innym skutkiem ograniczeń prowadzonych prac była konieczność zwiększenia wymiarów siłownika, ponad te wymagane w projekcie, podyktowana ograniczonym dostępem do specjalistycznego pieca, co z kolei skutkowało poważnym ograniczeniem liczby możliwych do przeprowadzenia prób treningu. Charakterystyczne konfiguracje zmodyfikowanego modelu przedstawiono na Ryc. 15.



Ryc. 15. Charakterystyczne konfiguracje prototypu: a. punkt Braille'a nieaktywny; b. punkt Braille'a aktywny; c. punkt Braille'a nieaktywny – szybka zmiana stanu członu wykonawczego. Na czerwono oznaczono sprężyny występujące w fazie austenitu, a na niebiesko strukturę martenzytu

Źródło: opracowanie własne

Zastosowanie dwóch sprężyn z materiału z pamięcią kształtu pozwoliło obniżyć dwukrotnie wymagania co do maksymalnego odkształcenia się pojedynczego elementu. Zwiększenie liczby sterowanych prądowo komponentów dało wymierne korzyści, przejawiające się obniżeniem wewnętrznej wysokości obudowy do 24,4 mm, jak również ponad dwukrotnie mniejszym zużyciem drutu z materiału inteligentnego.

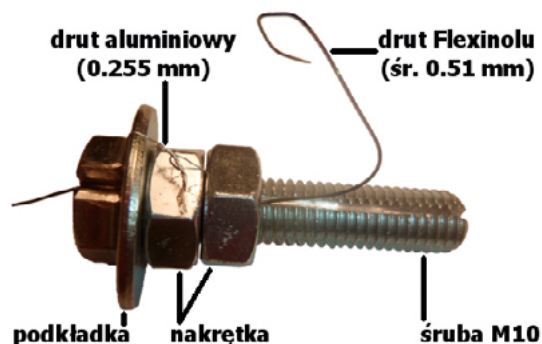
Do budowy prototypu zastosowano Flexinol, którego zakup podyktowany był dostępnością na polskim rynku¹⁴ oraz spełnieniem wymagań co do pożądanej średnicy drutu. Własności tego materiału zostały uwzględnione w przeprowadzonych obliczeniach.

¹⁴ Zob. *Flexinol® Actuator Wire*, <http://intmat.eu/pl/flexinol/15-flexinol-actuator-wire.html>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

Do nauki kształtów zastosowano autorski pomysł. Trening elementu polegał na odkształcaniu go dożądanego kształtu i następnie relaksacji powstałych naprężeń poprzez utrzymanie próbki w wysokiej temperaturze, ok. 500° C, na okres 10–20 minut. W trakcie procesu nauki zabezpieczano element przed próbą powrotu do pierwotnie zapamiętanego kształtu na skutek występujących naprężeń termicznych. Z tego względu wykonano zestaw mocujący, składający się ze śruby metrycznej, nakrętki i podkładki. Po zgrubnej obróbce mechanicznej na gwint elementu nawinięto drut z Flexinolu, który następnie zabezpieczono przed przemieszczeniem się względem obudowy. Gotowy zespół do treningu przedstawiono na Ryc. 16.

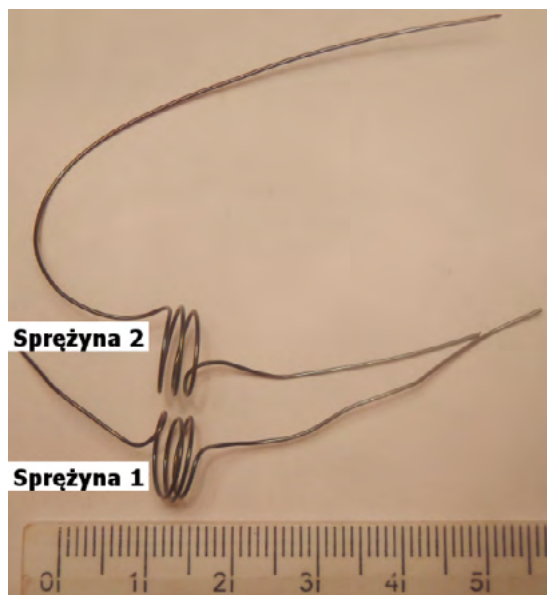
Próbki zostały wygrzane w piecu wysokotemperaturowym na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Konstrukcja urządzenia umożliwiła skrócenie czasu ogrzewania i chłodzenia próbek, co ma znaczący wpływ na efektywność procesu. Gotowe elementy przedstawiono na Ryc. 17.

W celach weryfikacji geometrii otrzymanych elementów dokonano pomiarów podstawowych parametrów otrzymanych sprężyn. Wyniki przedstawiono w Tabeli 1.



Ryc. 16. Drut z materiału z pamięcią kształtu w zespole blokującym. Komponenty gotowe do treningu

Źródło: opracowanie własne



Ryc. 17. Zdjęcie sprężyn z Flexinolu otrzymanych w wyniku przeprowadzonego treningu

Źródło: autor

Tab. 1. Parametry sprężyn otrzymanych w wyniku przeprowadzonego treningu

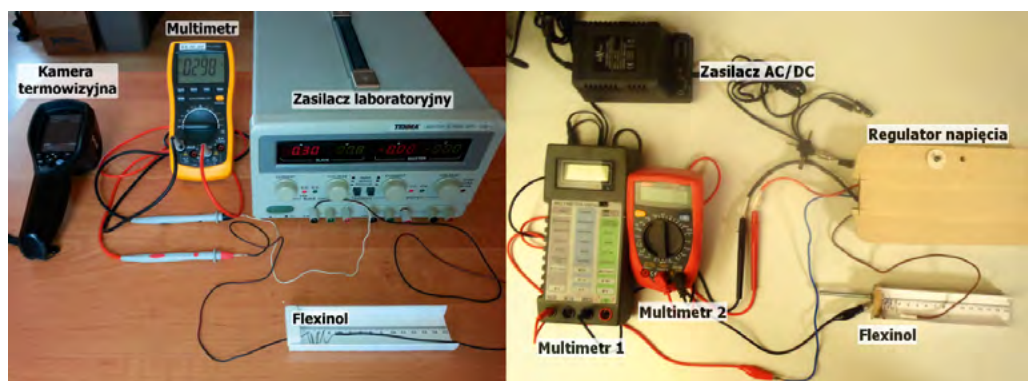
Numer sprężyny (Ryc. 17)	Liczba zwojów	Średnica wewnętrzna sprężyny [mm]	Długość swobodna sprężyny [mm]
1	2,75	8,4	2,5–3,7
2	2,75	8,4–8,8	3,6–4,1

Źródło: opracowanie własne

Wykazane różnice pomiędzy komponentami wynikają w głównej mierze z umieszczenia ich w dwóch różnych przygotowanych zestawach mocujących. Analiza tych zestawów wykazała spore niedokładności, tj. różnice pomiędzy elementami w poszczególnych modułach, spowodowane przeprowadzoną ręczną obróbką mechaniczną części. Powstałe luzy pomiędzy zestawem mocującym a drutem Flexinolu przyczyniły się do niedokładnego odwzorowania kształtu sprężyny śrubowej.

Sterowanie

W trakcie badań przeprowadzono eksperymenty mające na celu ustalić wartości parametrów prądowych koniecznych do zajścia pełnej przemiany martenzytycznej. Na Ryc. 18 przedstawiono zbudowane stanowiska badawcze. Dzięki wstępnym wynikom zaprojektowano i wykonano regulator napięcia zapewniający wymagane parametry zasilania komponentów wykonanych z Flexinolu. W obu stanowiskach pomiarowych stwierdzono całkowite zajście przemiany martenzytycznej w trakcie cyklu pracy fragmentu drutu Flexinolu.

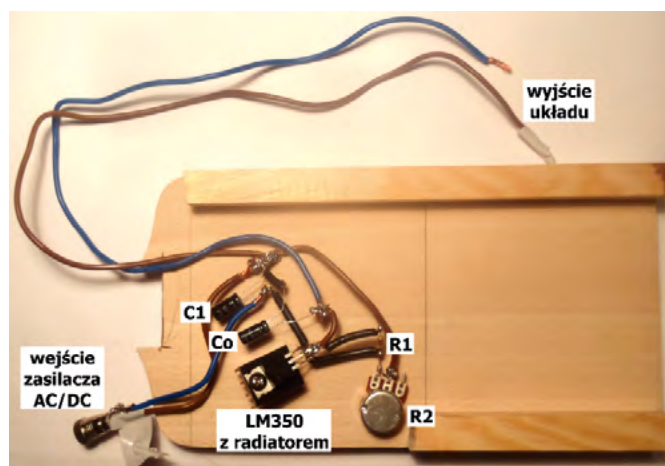


Ryc. 18. Stanowiska badawcze: po lewej skonstruowane na Akademii Górniczo-Hutniczej przy wykorzystaniu zasilacza laboratoryjnego; po prawej wykonane na bazie regulatora napięcia

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie otrzymanych wyników określono wymagane parametry prądowe. Określono moc elektryczną niezbędną do całkowitej przemiany martenzytu w austenit dla przyjętej długości próbki na poziomie 2 W.

Na Ryc. 19 przedstawiono gotowy układ elektroniczny, wykorzystany w omówionym stanowisku badawczym (Ryc. 18 po prawej).



Ryc. 19. Zdjęcie wykonanego regulatora napięcia opartego na stabilizatorze LM350 (na Ryc. 18 widoczne jest pokrętko potencjometru R2)¹⁵

Źródło: opracowanie własne

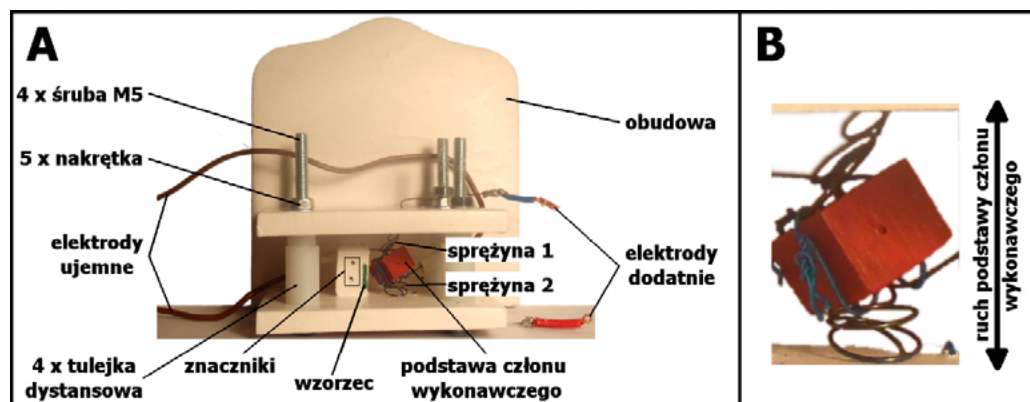
Testy prototypu punktu Braille'a

Dużym ograniczeniem w budowie prototypu siłownika były wymagania dotyczące jego wymiarów. Niestety, dokładność wydruku na dostępnej drukarce 3D okazała się zbyt niska dla potrzeb projektu, w związku z czym zrezygnowano z niego. Ostatecznie wycofano się z wykonania podłużnej części członu wykonawczego, a obudowę prototypu wykonano w drewnie. Ryc. 20 przedstawia złożony zestaw gotowy do testów.

Na Ryc. 20 zauważalne są znaczne wstępne nieosiowe ugięcia sprężyn. Powodem tego zachowania są wcześniej wspomniane odchylenia od żądanych parametrów powstałe w trakcie procesu treningu. Pomimo tego, możliwa była jednak identyfikacja poprawnego działania układu, pozwalająca na walidację otrzymanych wyników. Na Ryc. 21 przedstawiono zdjęcie wykonanego stanowiska pomiarowego do wyznaczania skoku prototypowego siłownika. Za pomocą dwóch regulatorów napięcia sterowano wartością natężenia prądu przepływającego przez poszczególne sprężyny wykonane z materiału z pamięcią kształtu.

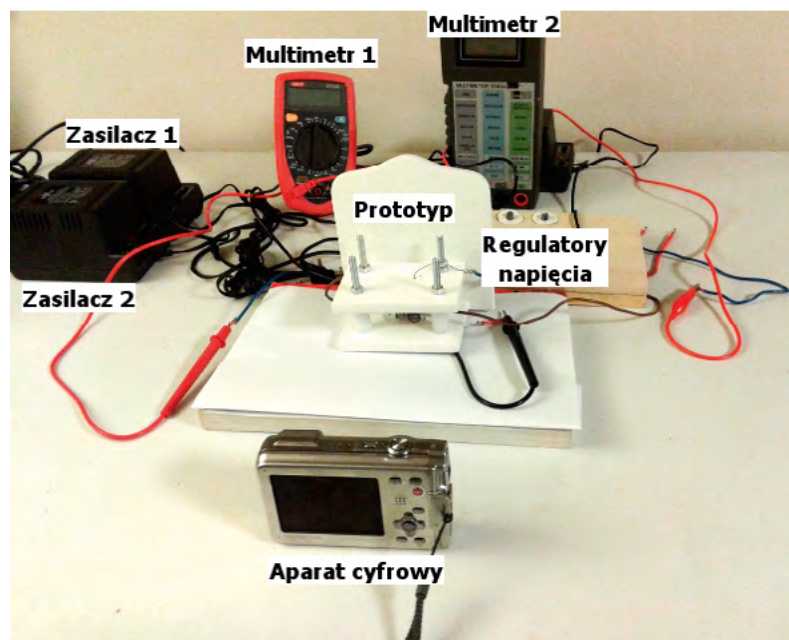
¹⁵ Zob. *Karta katalogowa LM350*, <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM350.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

Pomiary wielkości elektrycznych realizowane były za pomocą dwóch multimetrów. Ponadto, przy pomocy aparatu cyfrowego, zarejestrowano film dla przeprowadzonych eksperymentów. Na jego podstawie odczytywano różnice wysokości podstawy członu wykonawczego, a zamieszczony obok niego wzorzec (Ryc. 20 po lewej) pozwolił na przeskalowanie wyników z pikseli na milimetry.



Ryc. 20. Prototyp znaku tworzącego: A. część mechaniczna zespołu; B. prototyp siłownika

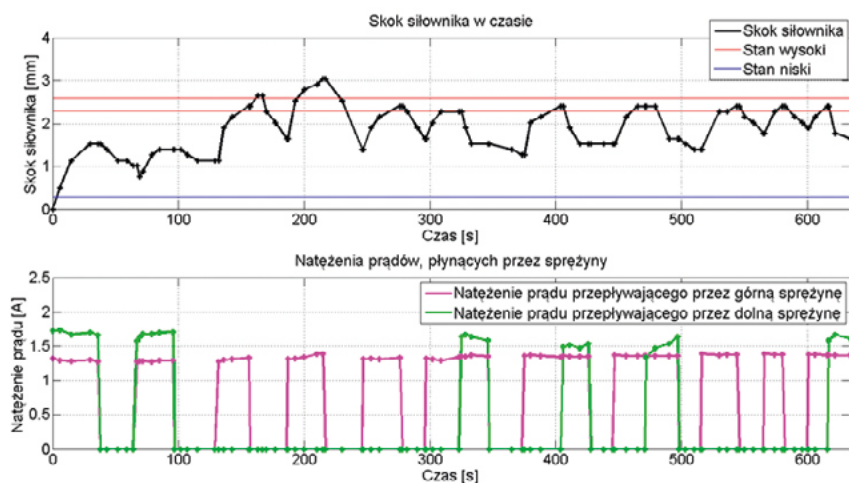
Źródło: opracowanie własne



Ryc. 21. Stanowisko pomiarowe do wyznaczania skoku prototypu siłownika

Źródło: opracowanie własne

Na stanowisku przedstawionym na Ryc. 21 przeprowadzono trzy eksperymenty o łącznym czasie trwania 29 minut, w trakcie których wystawiono 24 zmiany stanu punktu Braille'a. W celu przeprowadzenia analizy odczytano z zarejestrowanego filmu 297 punktów pomiarowych, na podstawie których przygotowano wykresy przedstawione na Ryc. 22.



Ryc. 22. Charakterystyki skoku siłownika oraz sterowania prądowego sprężyn dla trzeciego eksperymentu

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono prawidłowe działanie wykonanego układu sterowania. Niestety, analiza skoków siłownika wykazała uzyskanie dwukrotnie mniejszej wartości od oczekiwanej oraz brak powtarzalności podczas cyklicznej pracy układu. Prawdopodobnym powodem danego stanu były niedokładności wykonania sprężyn. Mimo to należy zwrócić uwagę na uzyskanie zbieżności co do rzędu wielkości skoku, co sugeruje przyjęcie poprawnej metody obliczeniowej. Istotnym faktem jest zbieżność wniosków, płynących z poszczególnych eksperymentów.

Ocena prototypu

Cena materiału z pamięcią kształtu użytego do wykonania prototypu siłownika wyniosła ok. 12 zł. W przeliczeniu na znak tworzący ośmiopunktowej metody Braille'a, koszt wyprodukowania modułu wyniósłby odpowiednio ok. 100 złotych. Biorąc pod uwagę niską cenę pozostałych podzespołów, można więc spodziewać się 3-4-krotnie mniejszej ceny za gotowe urządzenie w porównaniu do obecnie dostępnych komercyjnych linijek brajlowskich. Niestety, w realizowanym projekcie założono *a priori* konieczność stałego przepływu prądu przez aktywny

punkt Braille'a, podobnie jak ma to miejsce dla typowych odkształceniowych napędów piezoelektrycznych. Wiążą się z tym dwie niedogodności: duże straty energii elektrycznej (tj. krótszy czas działania urządzenia na jednym ładowaniu akumulatora) oraz niepożądana wymiana ciepła pomiędzy poszczególnymi siłownikami, mogąca doprowadzić do nieoczekiwanych zmian położenia członów wykonawczych. Z tego względu należy wziąć pod uwagę konieczność wykonania instalacji chłodzącej, mającej wpływ na wzrost ostatecznej ceny produktu.

Powyższych wad pozbawiona jest koncepcja oparta na jednokierunkowym efekcie pamięci kształtu. W tym przypadku ogrzanie próbki powyżej charakterystycznej temperatury jest konieczne jedynie w przypadku zmiany stanu punktu Braille'a. Tym samym straty energii, jak i przepływ ciepła, są znacznie mniejsze, niwelując potrzebę korzystania z systemu chłodzenia. Niestety, wyprowadzone relacje analityczne dla tej koncepcji oraz implementacja algorytmów genetycznych nie dały oczekiwanych rezultatów. Wprowadzone w opisie matematycznym zależności dla trzeciej fazy materiałowej, martenzytu niezbliznaczonego, spowodowały zbyt skomplikowanie modelu, a co za tym idzie, brak chociażby jednego poprawnego rozwiązania.

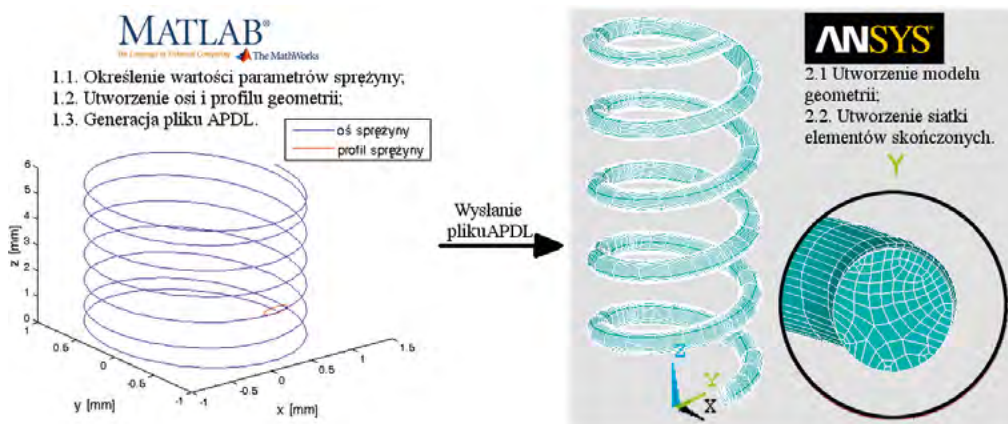
Zmiana sposobu prowadzenia obliczeń

Z tego względu w pracy rozpoczęto działania dotyczące zastąpienia równań analitycznych przez bardziej wszechstronne metody obliczeniowe. Tym samym zaproponowano algorytm, którego celem było utworzenie uniwersalnego narzędzia, wykonującego obliczenia automatycznie w pętli algorytmu genetycznego. Uniwersalność narzędzia oznacza w tym przypadku możliwość poszukiwania rozwiązania z pełnego zbioru konfiguracji projektowych. Efekt ten jest możliwy do zrealizowania, dzięki zmianie metody prowadzenia obliczeń, tzn. zastąpieniu równań analitycznych przez Metodę Elementów Skończonych (MES).

W pracy opracowano algorytm łączący w sobie funkcjonalność dwóch programów: MATLAB'a oraz ANSYS'a. W pierwszym z nich implementowany jest algorytm genetyczny, w którym generowane są własności osobników, reprezentujących sprężyny wykonane z Flexinolu. Następnie tworzony jest plik w języku APDL ze współrzędnymi elementu, który przesyłany jest do ANSYS'a. Na podstawie wczytanego dokumentu tworzona jest geometria i siatka elementów skończonych oraz nadawane są własności materiałowe. Niestety, na tym etapie zakończono pracę nad algorytmem. Powodem jest brak implementacji odpowiedniego modelu materiałowego w środowisku ANSYS. Oczywiście, istnieje możliwość zdefiniowania w programie własnych zjawisk fizycznych, jednak wykraczało to poza przyjęty zakres pracy. Ostatecznie implementacja modelu materiałowego pozwoliłaby na wykonanie symulacji statycznych i dynamicznych, których wyniki służyłyby do wyznaczenia oceny przystosowania poszczególnych osobników reprezentujących

symulowane sprężyny. W ramach badań opracowano kod odpowiedzialny za realizację wszystkich wymienionych zadań, poza wykonaniem właściwej symulacji w programie ANSYS. Tym samym działanie algorytmu kończy się na utworzeniu w preprocesorze geometrii oraz siatki elementów skończonych. Przykład tak powstałej sprężyny o losowych parametrach przedstawiono na Ryc. 23.

Ostateczne zakończenie implementacji algorytmu pozwoliłoby na jego dalsze rozbudowanie, włączając zastosowania algorytmów optymalizacyjnych wbudowanych w środowisko ANSYS. Takie postępowanie daje nadzieję na znalezienie poprawnych rozwiązań dla zaproponowanych rodzajów siłowników, jak również innych konfiguracji nieomówionych w pracy.



Ryc. 23. Schematyczne przedstawienie procesu powstawania modelu sprężyny z podziałem zadań względem programów, w których są wykonywane

Źródło: opracowanie własne

Dalsze kierunki prac

Przeprowadzone eksperymenty na prototypie nie pozwalają w sposób jednoznaczny potwierdzić dokładności wyprowadzonych zależności analitycznych. Na wstępie należałoby zmienić metodę obróbki mechanicznej z ręcznej na np. wykonaną na maszynach CNC do zagwarantowania dokładności wystarczającej dla budowanych prototypów.

Przy ponownym planowanym przeprowadzeniu eksperymentów dla zmodyfikowanych konstrukcji siłownika należałoby się dodatkowo zastanowić nad sposobem pozyskiwania danych pomiarowych. Zastosowana analiza kolejnych klatek uzyskanych z aparatu cyfrowego jest pracochłonna, a tym samym nieefektywna. Z tego względu model należałoby przygotować do przeprowadzenia analizy obrazów, która pozwalałaby na automatyczne rejestrowanie danych z filmu. Ponadto należałoby zwrócić dodatkowo szczególną uwagę na oświetlenie kadru. Prawdopodobnie konieczne byłoby wykonanie stacjonarnego stanowiska badawczego

o charakterystycznych, stałych parametrach, pozwalających na powtarzalność pomiarową. W celu pełnej automatyzacji procesu należałoby również zastosować multimetry z wbudowanym interfejsem USB, pozwalającym na bezpośredni zapis danych na dysku jednostki centralnej.

Wprowadzenie powyższych poprawek pozwoliłoby na uzyskanie bardziej wiarygodnej charakterystyki przemieszczeniowej siłownika. W celu weryfikacji parametrów wspomnianej charakterystyki należałoby wykonać maszynę wytrzymałościową dedykowaną dla stosunkowo małych wartości przemieszczeń i sił, gdyż typowe oprzyrządowanie laboratoriów uczelnianych nie jest przystosowane do badania tego typu charakterystyk przemieszczeniowych. W nagrodzonej pracy magisterskiej, która stanowiła inspirację do napisania tego artykułu, zaproponowano schemat dedykowanego urządzenia.

Ponadto, po raz kolejny należy wspomnieć o potrzebie zaimplementowania bardziej uniwersalnej metody od rozważań teoretycznych, np. metody elementów skończonych. Możliwość przeprowadzenia obliczeń dla szerszego zbioru potencjalnych rozwiązań daje większe nadzieje na znalezienie bardziej korzystnych konfiguracji. W szczególności dotyczy to drugiego zaproponowanego modelu, uwzględniającego jednokierunkowy efekt pamięci kształtu, dla którego nie udało się znaleźć poprawnego rezultatu w sposób opisany w artykule. Możliwość wykonania działającego prototypu dla tego układu mechanicznego daje nadzieję na otrzymanie urządzenia znacznie tańszego i o większych możliwościach od obecnie dostępnych komercyjnych linijek brajlowskich.

Podsumowanie

Obecne na rynku wyświetlacze alfabetu Braille'a nie są urządzeniami spełniającymi wszystkie wymagania osób niepełnosprawnych. Z dużą dozą prawdopodobieństwa należy stwierdzić, że za brakiem postępu kryje się zapewne zbyt wąska grupa odbiorców dla potencjalnych producentów, a przez to ograniczone możliwości w generowaniu znaczących przychodów. Z tego względu nie można oczekiwać dynamicznego rozwoju komercyjnych rozwiązań w omawianej tematyce.

Mimo to problem dość chętnie poruszany jest przez grono akademickie, dla którego stanowi on interesujące wyzwanie, także wymagające od strony projektowej. Z tego też względu w literaturze tematu można znaleźć sporą porcję artykułów poświęconych niekonwencjonalnym próbom rozwiązania problemu. Spora część koncepcji opiera się na zastosowaniu materiałów inteligentnych. Ta grupa twórców otworzyła nowe możliwości przed projektantami, zachęcając swoimi unikatowymi własnościami do prób zastosowania ich w mikroukładach, gdzie standardowe podejścia często okazują się zawodne.

Również ten artykuł powstał podczas realizacji projektu, którego celem jest rozwiązanie problemów obecnych w elektronicznych wyświetlaczach alfabetu

Braille'a poprzez zastosowanie materiałów inteligentnych. W pracy zaproponowano dwie konfiguracje siłowników punktu Braille'a, dla których wykonano odpowiednio po dwa opisy zależności analitycznych: jeden dla sprężyn naciskowych, drugi dla naciągowych. Dodatkowo ze względu na złożoność problemu, zarówno od strony parametrów fizycznych, jak i ekonomicznych, posłużono się algorytmami genetycznymi do znalezienia suboptymalnego rozwiązania.

Ze względu na ograniczone środki, jak również czas realizacji pracy, nie można jej traktować jako dającą wyczerpującą odpowiedź na pytanie o możliwość wykonania elektronicznego wyświetlacza na bazie materiałów z pamięcią kształtu. Poruszone zagadnienia dają jedynie sugestie co do potencjalnych możliwości ze wskazaniem hipotetycznie rentownych dalszych kierunków rozwoju projektu. Z pełnym przekonaniem można jednak stwierdzić, że omówione pomysły dają nadzieję na uzyskanie w pełni działającego produktu, który byłby w stanie rywalizować z obecnymi komercyjnymi urządzeniami, zarówno od strony ekonomicznej, jak i prezentowanych możliwości.

Bibliografia

Książki, czasopisma

Anshul S., Pranay J., Piyush C. i in., *Application of Shape Memory Alloy (SMA) based actuation for refreshable display of Braille*, Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Portland, Oregon, USA, 4–7.08.2013

Łukasiak E., Oleksiak E., *Osoby niewidome i niedowidzące*, [w:] *Zbiórca raport z diagnozy świadczonych usług z zakresu rehabilitacji społecznej dla osób niepełnosprawnych w Polsce*, Warszawa, Fundacja im. Stefana Batorego, 2011

Rutkowski L., *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 2012

Skorupa A., Skorupa M., *Wytrzymałość materiałów*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2000

Yusaku K., Tsuyoshi S., Makoto T. i in., *Sheet-type Braille displays by intergrating organic field-effect transistors and polymeric actuators*, „IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES” 2007, Nr 2(54)

Strony internetowe

Bar-Cohen Y., *Dynamic Braille*, <http://www.nbp.org/downloads/cbi/DynamicBraille.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

Center for Braille Innovation. *Leveraging Braille Technology for Future Generations*, <http://www.nbp.org/downloads/cbi/NBP-CBI-Wt-Paper.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

Dhambarage R., Wijayarathne S., Weerakkody D. i in., *Braille to go Smartphone*, <http://www.nbp.org/downloads/cbi/brailletogosmartphone.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]

- Fast, accurate force and position control of shape memory alloy actuators*, <http://royfeatherstone.org/SMA/YHTthesis.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]
- Flexinol® Actuator Wire*, www.intmat.pl, [dostęp z dnia: 10.11.2015]
- Grzymkowska M., *Aktywność zawodowa osób niewidomych – najważniejsze dane*, <http://watchdogpfron.pl/aktywnosc-zawodowa-osob-niewidomych-najwazniejsze-dane/>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]
- Karta katalogowa LM350*, <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM350.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]
- Louis Braille*, <http://www.nbp.org/ic/nbp/braille/whoislouis.html>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]
- Oferta firmy P. H. U. Impuls*, http://www.phuimpuls.pl/?monitory_brajlowskie,44,2, [dostęp z dnia: 10.11.2015]
- Strona firmy Metec*, <http://www.nbp.org/downloads/cbi/DynamicBraille.pdf>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]
- Tadeusiewicz R., *Modelowanie systemu wzrokowego*, http://www.uci.agh.edu.pl/uczelnia/tad/Slajdy_z_wykladow_Biocybernetyki_2013/, [dostęp z dnia: 10.11.2015]
- Visual impairment and blindness*, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/en/>, [dostęp z dnia: 10.11.2015]