



Analiza porównawcza wybranych parametrów użytkowych pojemnościowych przycisków dotykowych

MARIUSZ MŚCICHOWSKI¹, GRZEGORZ BIESZCZAD²,
PAWEŁ HORBACZEWSKI³

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
00-908 Warszawa, mariusz.mscichowski@student.wat.edu.pl

² Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ul. gen. S. Kaliskiego 23A
00-908 Warszawa, grzegorz.bieszczad@wat.edu.pl

³ inkBOOK EUROPE sp. z o.o., ul. A. Ostrowskiego 7, 53-238 Wrocław,
pawel.horbaczewski@inkbook.ltd

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd różnych rodzajów przycisków dotykowych, a następnie porównano standardowe przyciski pojemnościowe typu *self-capacitance* z przyciskami Metal Over Cap Technology (MoCT), czyli działającymi przez ugięcie warstwy przewodzącej.

Przeprowadzono symulację dwóch typów przycisków dotykowych. Przycisk typu *self-capacitance* został zasymulowany za pomocą modelu wbudowanego w oprogramowaniu CapExt, natomiast przycisk typu MoCT wymagał wykonania specjalnego modelu w celu uwzględnienia zjawisk zachodzących w tej technologii. Zaprojektowano i wykonano dwa modele fizyczne przycisków pojemnościowych. Zbadano ich parametry i porównano z wynikami symulacji. Zaprojektowano i zbudowano przyrząd pozwalający z dużą dokładnością i powtarzalnością symulować dotyk. Przedstawiono wyniki badań siły nacisku wymaganej do aktywacji czujnika wykonanego w technologii MoCT oraz porównywano je z parametrami przycisków mechanicznych.

Z badań wynika, że detektory dotykowe w technologii MoCT charakteryzują się dużą odpornością na fałszywą detekcję. Opisane w artykule badania pozwalają na dobór skutecznie działających materiałów konstrukcyjnych dla przycisków MoCT w zależności od wymaganych parametrów użytkowych (jak siła nacisku) i konstrukcyjnych — wymagana grubość (wytrzymałość) materiału panelu dotykowego. Analiza porównawcza danych empirycznych i wyników symulacji przeprowadzonych w dostępnym komercyjnie oprogramowaniu pozwala na przyspieszenie procesu projektowania tego typu przycisków i wprowadzenie odpowiednich poprawek do wyników symulacji w procesie projektowania docelowego urządzenia.

Słowa kluczowe: czujnik pojemnościowy dotykowy, pojemnościowy czujnik siły, skuteczność wykrywania
DOI: 10.5604/01.3001.0016.2814

1. Wprowadzenie

Historia sensorów dotykowych sięga lat 50. XX wieku. Pierwszy opis urządzenia wykorzystującego tę technologię można znaleźć w patencie nr US2810066A [1] z 1954 r. i przedstawia lampę z pojemnościowym włącznikiem dotykowym. Od tego czasu detektory dotykowe sprawdziły się jako wygodny interfejs człowiek – maszyna i są wciąż rozwijane. Najczęstszym zastosowaniem dla tego typu sensorów są urządzenia konsumenckie takie jak smartwatche, urządzenia wspomagające trening fizyczny, miniaturowe urządzenia wkładane do ucha, jak słuchawki i aparaty słuchowe [2], jednak coraz częściej są również wykorzystywane w urządzeniach militarnych i przemysłowych [3], nie tylko do realizacji interfejsu użytkownika, lecz także np. jako sensory położenia manipulatorów przemysłowych i detekcji towaru. Ponadto intensywnie rozwijającą się gałęzią zastosowań dla tego typu czujników są urządzenia z rodziny elektroniki tekstylnej [4, 5]. Jest wiele rodzajów tego typu sensorów, generalnie dzieli się je na: rezystancyjne, światłoczułe, pojemnościowe, indukcyjne oraz piezoelektryczne, istnieją jednak liczne warianty i sposoby realizacji czujników w tych technologiach [6].

1.1. Budowa sensorów dotykowych

W konstrukcji klawiatur dotykowych stosuje się różne rodzaje sensorów:

- czujnik rezystancyjny,
- dotykowy sensor światłoczuły,
- detektor piezoelektryczny,
- czujnik indukcyjny,
- pojemnościowy czujnik dotykowy.

Rezystancyjne czujniki działają na zasadzie zmiany rezystancji, najczęściej przez fizyczne dotknięcie palcem odkrytych pól przewodnika lub zmianę rezystancji pod wpływem odkształceń (tensometry).

Dotykowy sensor światłoczuły działa na zasadzie przysłonięcia wiązki światła wpadającego do detektora. Źródłem światła może być otoczenie lub nadajnik współpracujący z układem odczytu.

Detektory piezoelektryczne wykorzystują zjawisko piezoelektryczne polegające na przetworzeniu zmiany kształtu lub oddziaływania sił na sygnał (napięcie) elektryczny. Przycisk z czujnikiem piezoelektrycznym działa podobnie jak mikrofon piezoelektryczny, z tą różnicą, że źródłem drgań nie jest fala akustyczna, a fizyczne odkształcenie. Wytworzone napięcie jest wykorzystywane do stwierdzenia dotyku.

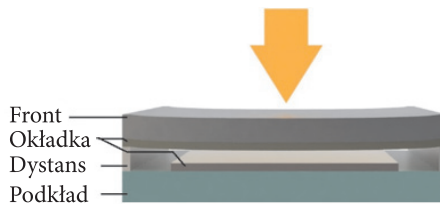
W czujnikach indukcyjnych głównym elementem wykonawczym jest cewka. Wymuszając przepływ prądu przez cewkę, indukuje się wokół niej pole elektromagnetyczne, które oddziałuje na metalowy przycisk. Jego ugięcie zaburza to pole, które jest mierzone przez układ odczytu.

Najpowszechniej obecnie stosowanym sensorem dotykowym jest pojemnościowy czujnik dotykowy, którego warianty znajdujemy w tabletach, telefonach i komputerach oraz coraz częściej w urządzeniach automatyki domowej i IoT. Popularność pojemnościowych przycisków dotykowych rośnie wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej małych i tanich układów scalonych potrafiących obsłużyć tę technologię oraz wzrostem precyzji i szybkości wbudowanych w mikrokontrolery przetworników analogowo-cyfrowych. Zasada działania takiego sensora oraz jego budowa są następujące: elementem wykonawczym jest pole przycisku dotykowego wykonane z warstwy przewodzącej, które tworzy wraz z polem referencyjnym kondensator. Najprostszy układ odczytu wysyła krótkie impulsy, ładując kondensator, i odczytuje, po ilu impulsach napięcie dojdzie do pożądanej wartości. Ponieważ pojemność utworzonego kondensatora jest rzędu dziesiątek pikofaradów, to impulsy muszą być krótkie, a układ odczytu szybki. Przyłożenie palca do powierzchni zewnętrznej przycisku dotykowego tego typu stanowi dodatkową równoległą pojemność dla układu [7], co ostatecznie zwiększa wartość pojemności przycisku, a więc wydłuża czas ładowania kondensatora. Gdy mierzony czas ładowania przekroczy pewien ustalony próg, to układ odczytu informuje o zmianie stanu danego sensora. Współczesne układy odczytu są dużo bardziej rozbudowane, odczytują wiele sensorów jednocześnie, mają możliwość wykrywania i ignorowania fałszywych sygnałów, autokalibracji sensorów i wiele innych udogodnień wspomagających projektantów. Same układy odczytu mogą działać na logicznych poziomach cyfrowych oraz na szybkich układach ADC.

Najbardziej rozpowszechnionym sensorem stosowanym w klawiaturach dotykowych jest pojemnościowy sensor dotykowy typu TC (*Touch Capacitance*). Podstawowym problemem klasycznych pojemnościowych sensorów tego typu jest konieczność przyłożenia do elementu dotykowego ciała zmieniającego jego pojemność (np. palec człowieka, element metalowy, specjalny rysik dotykowy). Z tego powodu w niektórych przypadkach sensor TC może nie działać prawidłowo. Przykładem wadliwego działania jest sytuacja, w której użytkownik próbuje nacisnąć przycisk za pośrednictwem przedmiotu zbudowanego z materiałów nieprzewodzących (np. grube rękawiczki, sucha skóra, izolujące obuwie, elementy plastikowe lub gumowe). Kolejnym poważnym problemem jest czułość klasycznych przycisków pojemnościowych, uwarunkowana konduktywnością przykładanego ciała (np. palca użytkownika), która jest zależna m.in. od warunków pogodowych i fizjologicznych danego człowieka. Dodatkowo klasyczne pojemnościowe przyciski dotykowe są trudne w użytkowaniu przez osoby niewidome i niedowidzące ze względu na brak haptycznego sprzężenia zwrotnego takiego przycisku.

Nowocześniejszym rozwiązaniem pojemnościowego czujnika dotykowego jest przycisk typu MoCT (ang. *Metal over Cap Technology*). Jest to sensor będący istotnym rozwinięciem technologii TC ze zmodyfikowaną budową (rys. 1). Wykorzystuje tę samą własność kondensatora, czyli pojemność zmieniającą się wraz z odległością

między okładkami kondensatora, jednak w inny sposób niż w sensorze TC. Pierwszą okładką kondensatora jest powierzchnia przycisku dotykowego (bezpośrednio na podkładzie), natomiast drugą okładkę budowanego kondensatora stanowi warstwa przewodząca o potencjale masy wbudowana we front obudowy przycisku. W tym typie przycisku w odróżnieniu od przycisku TC druga okładka kondensatora jest zainstalowana na stałe, natomiast właściwości elektryczne obiektu przyłożonego do przycisku są bez znaczenia. W sensorze MoCT zainstalowany jest stały nieściśliwy element dystansowy ustalający odległość między okładkami kondensatora. Przyciski typu MoCT w znacznym stopniu eliminują problemy występujące w klasycznych sensorach TC [8], ponieważ łączą cechy pojemnościowych przycisków dotykowych z przewodzącą warstwą zewnętrzną stosowaną w indukcyjnych przyciskach dotykowych. Dodatkowo są dzięki temu bardziej niezawodne i tańsze.



Rys. 1. Budowa przycisku MoCT

1.2. Geneza pracy

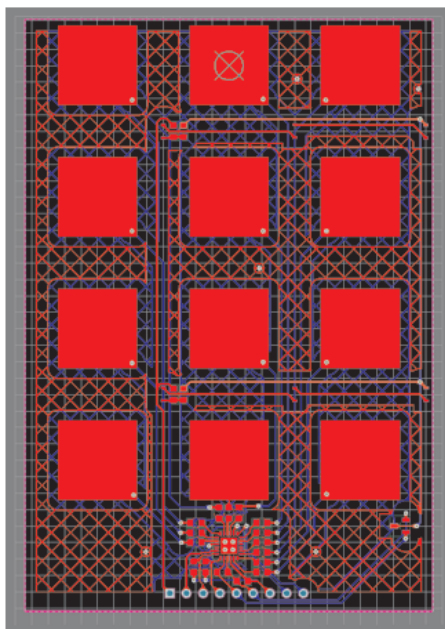
Przyciski typu MoCT są stosunkowo nowym rozwiązaniem, a ich największą zaletą wynikającą z budowy powinna być odporność na warunki nacisku oraz znacznie większa czułość niż tradycyjnych przycisków TC. Większa czułość przycisków powinna pozwolić na znaczną miniaturyzację interfejsu użytkownika i stosowanie przycisków pojemnościowych w miniaturowych urządzeniach, do zastosowań specjalnych w trudnych warunkach użytkowania oraz w urządzeniach o nietypowych kształtach. W celu weryfikacji istniejących metod projektowania i opracowania nowych dla tego typu architektury przycisku dotykowego należy przygotować wiarygodny protokół pomiaru właściwości przycisków i protokoły weryfikacji poprawności ich działania w trudnych warunkach użytkowania. W dalszej części artykułu opisano metodę i stanowisko do pomiaru podstawowych istotnych parametrów przycisków tego typu. Wyniki pomiarów na zaproponowanym stanowisku porównano z wynikami symulacji układu. Dodatkowo przeprowadzono analizę porównawczą konstrukcji i materiałów, które można w nich zastosować. Pozwala to na dobór odpowiednich materiałów do wybranego zastosowania.

2. Stanowisko do pomiaru właściwości przycisków pojemnościowych MoCT

W celu zbadania charakterystyk sensorów dotykowych zaprojektowana została typowa referencyjna klawiatura w organizacji 3 x 4 (rys. 2) z układem odczytu zbudowanym na bazie układu ATtiny1617 firmy Microchip z wbudowaną sprzętowo obsługą do 14 niezależnych sensorów pojemnościowych (*self-capacitance*) lub do 49 sensorów pracujących w trybie matrycowym. Układ sensorów został zaprojektowany na wzór klawiatur stosowanych w układach dostępu z cyframi od 0 do 9 oraz dodatkowymi polami oznaczonymi jako „OK” oraz „C”. Tego typu projekt klawiatury pozwala na porównanie jej parametrów użytkowych z powszechnie stosowanymi i komercyjnie dostępnymi rozwiązaniami klawiatur wykonanych w różnych technologiach. W projekcie wykorzystano tryb *self-capacitance* obsługi sensorów dotykowych pozwalający na wykonanie przycisków typu TC oraz MoCT. Na złączu diagnostycznym wyprowadzone zostały linie komunikacyjne: UART, I2C/SPI oraz linie zasilania do obsługi mikrokontrolera jednocukrowego realizującego funkcje układu odczytu pojemności. Program mikrokontrolera został zaprojektowany przy użyciu oprogramowania Microchip Studio z wykorzystaniem Atmel Start Project — umożliwiając komunikację z oprogramowaniem Atmel Data Visualizer [9]. Najistotniejszym parametrem pomiarowym jest liczba impulsów niezbędnych do naładowania pojemności przycisku do poziomu progowego. W normalnej pracy przycisku pojemnościowego pracującego z tego typu układem odczytu istotną wartością jest różnica pomiędzy referencyjną liczbą impulsów (przycisk w stanie spoczynku) a bieżącą liczbą impulsów (przycisk z fizycznym wymuszeniem), liczba ta jest oznaczana jako Delta. W zależności od czułości układu liczba Delta może być różna dla tego samego wymuszania (np. dotyku o danej sile).

W celu wykonania wstępnej analizy poprawności działania klawiatury projekt płytki drukowanej zaimportowano do symulatora przycisków pojemnościowych CapExt [10]. Ponieważ oprogramowanie to nie obsługuje wprost technologii MoCT, został opracowany specjalny autorski sposób modelowania. Model przycisku dotykowego zaimplementowany w oprogramowaniu CapExt uwzględnia geometrię przycisku oraz oblicza pojemność elektryczną — pasożytniczą układu przycisku w odniesieniu do zdefiniowanych przewodzących powierzchni, a także użyteczną zmianę pojemności pod wpływem obecności elektrycznego modelu palca człowieka. Modyfikacja modelu polegała na zastosowaniu jedynie możliwości obliczania pojemności pasożytniczej w parametrycznym modelu układu przycisku MoCT uwzględniającym ugięcie (zbliżenie) powierzchni zewnętrznej, a więc na naniesieniu dodatkowej warstwy zewnętrznej o potencjale masy w ściśle określonej odległości względem sensorów dotykowych. Warstwa ta pełniła funkcję zewnętrznej okładki kondensatora w przycisku MoCT.

Biorąc pod uwagę zarówno wysokość planowanego dystansu, jak i grubość maski lutowniczej w planowanej płytce obwodu drukowanego oraz ugięcie wynikające z przyciśnięcia klawisza, możliwe było zasymulowanie zmian pojemności własnej układu, w zależności od fizycznego ugięcia wprowadzonej dodatkowej warstwy o potencjale masy.



Rys. 2. Projekt pojemnościowej klawiatury dotykowej

TABELA 1

Tabela użytych frontów dotykowego przycisku pojemnościowego

Lp.	Materiał frontu	Technologia przycisku	Grubość materiału [mm]
1	Szkło	TC	2
2	PMMA	TC	2
3	Szkło z warstwą przewodzącą	MoCT	0,5
4	PMMA z warstwą przewodzącą	MoCT	0,5
5	Mosiądz	MoCT	0,5
6	Stal nierdzewna H17	MoCT	0,5
7	Stal nierdzewna H18	MoCT	0,5
8	Aluminium	MoCT	0,5

Zaprojektowaną klawiaturę stworzono w sposób umożliwiający zastosowanie kilku wariantów wykonanych frontów i dwóch rodzajów przycisków. Zestawienie wariantów klawiatury podlegających pomiarom przedstawiono w tabeli 1.

W wariacie klawiatury wykonanej w technologii TC front przyklejony został bezpośrednio do laminatu FR4, tak aby pomiędzy frontem i detektorem nie znajdowało się powietrze. Zmiana sygnału Delta następuje przez zaburzenie pojemności pod wpływem zbliżającego się obiektu przewodzącego, takiego jak palec człowieka. Natomiast w technologii MoCT w odległości 60 μm od pola dotykowego umieszczony został front wykonany z materiału przewodzącego o potencjale masy. Odległość została zdefiniowana grubością warstwy błony klejowej 3M 467MP umieszczonej między warstwami. Zmiana pojemności przycisku MoCT w takim układzie następuje przez ugięcie jego zewnętrznej powierzchni.

3. Cel i opis badań

Celem eksperymentów było porównanie pojemnościowych przycisków wykonanych w technologii MoCT z klasycznymi przyciskami pojemnościowymi typu TC oraz z klasycznymi przyciskami mechanicznymi. Opracowano metodykę i wykonano badania: odporności na zalanie wodą, czułości układu dotykowego oraz wymaganej siły nacisku do detekcji dotyku.

3.1. Pomiar odporności na wodę

W celu oceny wrażliwości detektorów na zewnętrzne warunki atmosferyczne wykonano pomiar odporności na wodę. Przyciski dotykowe *self-capacitance* są bardzo wrażliwe na wodę zarówno przepływającą, jak i stojącą. Wykonano dwa rodzaje eksperymentów w celu sprawdzenia wpływu wody na testowane przyciski dotykowe — na wodę spływającą oraz stojącą. Eksperyment polegał na ustawieniu klawiatury w pozycji pionowej oraz poziomej i nanoszeniu wody w sposób kontrolowany za pomocą kroplomierza. Dane odczytywano bezpośrednio z oprogramowania Atmel Data Visualizer. Pomiar dotyczący wpływu pojedynczych kropli polegał na naniesieniu kropli na powierzchnię przycisku w pozycji pionowej i odczycie zmiany wartości wskazania przetwornika (wartość Delta). Pomiar związany z wpływem wody stojącej polegał na naniesieniu na powierzchnię klawiatury w pozycji poziomej warstwy wody i odczycie wartości Delta. Zbadano amplitudę sygnału Delta w obu przypadkach i obu technologiach wykonania przycisku, a następnie porównano z wartościami sygnału typowymi dla przyciśnięcia przycisku przez użytkownika.

3.2. Czułość układu

Wykonano pomiar wpływu odległości elementu przewodzącego (imitatora palca człowieka) od zewnętrznej powierzchni dotykowej na zmianę pojemności układu przycisków pojemnościowych. Pomiaru polegały na uruchomieniu klawiatury poza układem imitującym dotyk w celu ustalenia początkowych stanów sensorów. Następnie klawiatura została umieszczona w układzie pomiarowym z elementem imitującym dotyk (płaski element o średnicy 13 mm wykonany z materiału przewodzącego). Wykonano dziesięć serii pomiarów w równych odległościach z krokiem 100 μm , rozpoczynając od 1,5 mm aż do zetknięcia z powierzchnią dotykową. Sumarycznie dokonano 150 pomiarów dla każdego rodzaju badanego przycisku. W rezultacie wyznaczono charakterystyki wartości sygnału Delta w stosunku do odległości elementu wymuszającego od okładki sensora.

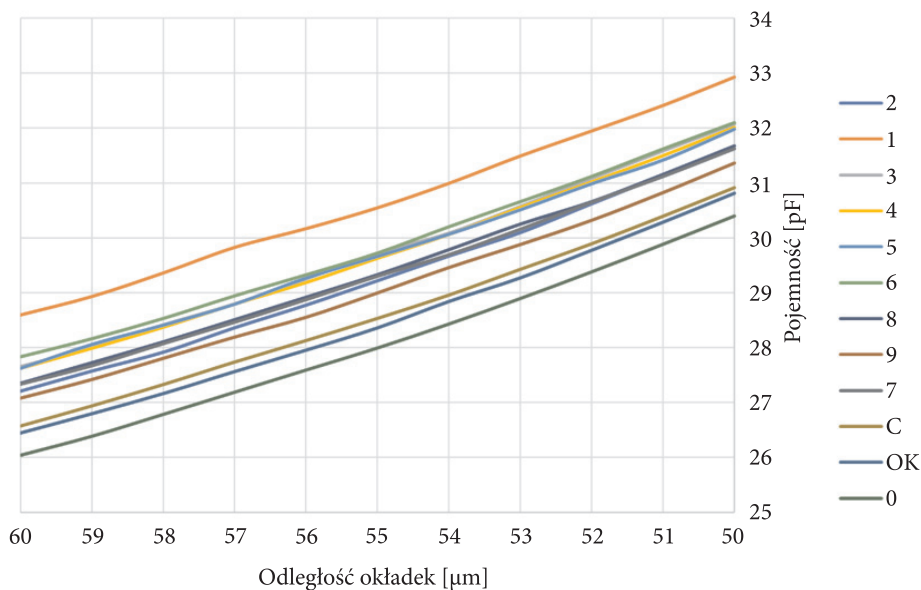
3.3. Wpływ siły nacisku na detekcję dotyku

W celu oceny siły nacisku, a także porównania do układów mechanicznych i zbadania komfortu pracy z dotykowymi przyciskami typu MoCT wykonano pomiary wpływu siły nacisku na detekcję dotyku. W oprogramowaniu CapExt zasymulowane zostały pojemności względem odległości między okładkami kondensatora, które przedstawiono na rysunku 3. Korzystając ze wzoru na pojemność kondensatora płaskiego, obliczono również teoretyczne pojemności zbudowanego kondensatora w zależności od odległości okładek.

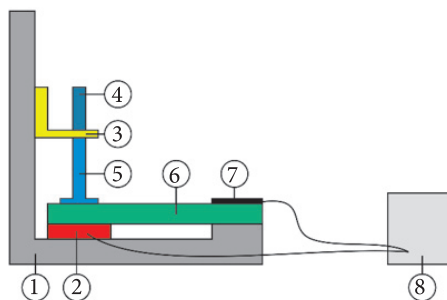
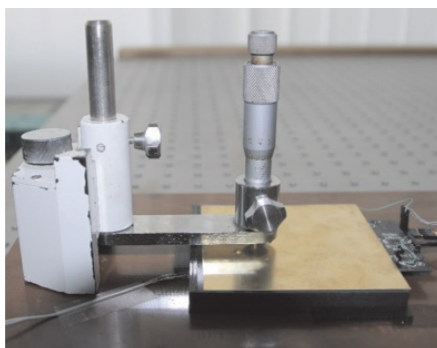
Następnie zmierzono zbudowane modele fizyczne przycisków. W celu zbadania właściwości użytkowych przycisku MoCT zaprojektowano i wykonano układ pomiarowy (rys. 4), w skład którego wchodzi: stół z dociskiem mikrometrycznym umożliwiającym regulację pozycji wymuszenia mechanicznego z rozdzielczością 10 μm , tensometryczny czujnik siły oraz mechaniczne mocowanie badanej klawiatury. Klawiatura ta składa się z następujących warstw: mozaika połączeń elektrycznych i przycisków pojemnościowych wykonana na laminacie FR4, dystans z błony klejowej, front zewnętrzny oraz dodatkowe elementy montażowe.

W testach technologii MoCT wykorzystano różne powierzchnie dotykowe. Zestawienie użytych materiałów i parametrów powierzchni frontowych zostało przedstawione w tabeli 1.

Symulacja wpływu ugięcia powierzchni do pojemności

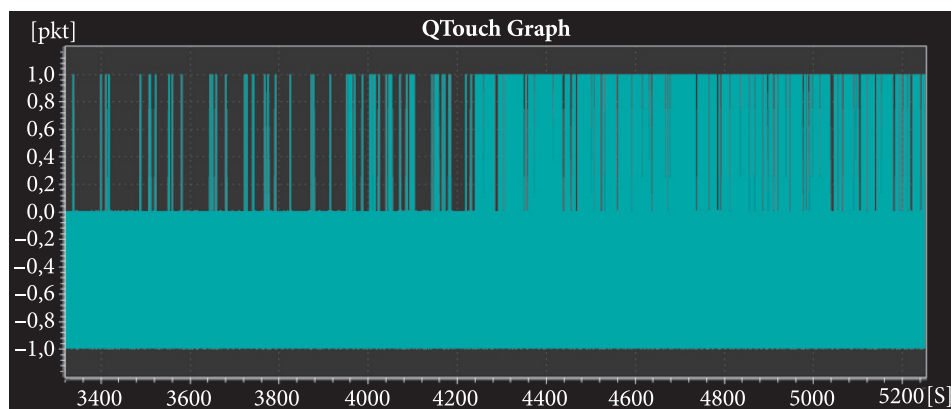


Rys. 3. Wyniki symulacji zależności pojemności przycisków klawiatury od odległości okładek



Rys. 4. Zdjęcie oraz schemat układu do charakteryzacji przycisku pojemnościowego w technologii TC i MoCT. 1. Rama zestawu pomiarowego; 2. Siłomierz tensometryczny; 3. Uchwyt śruby mikrometrycznej; 4. Śruba mikrometryczna; 5. Regulowany docisk; 6. Badany układ TC/MoCT; 7. Układ odczytu ATtiny1617; 8. Komputer pomiarowy

Ustalenie pozycji zerowej przed badaniem polegało na zamontowaniu klawiatury wewnątrz przyrządu umożliwiającego ustalenie przesunięć z rozdzielczością $10\ \mu\text{m}$, a następnie regulacji wysokości przyrządu do momentu, gdy wartości odczytane z czujnika dotyku lub tensometrycznego czujnika siły są na granicy zmiany. Badanie polegało na wykonaniu 10 serii z 20 pomiarami z krokiem $10\ \mu\text{m}$ dla każdej powierzchni zewnętrznej, a wyniki uśredniono w celu prezentacji wyników. Pozostawiono również urządzenie na stanowisku w celu pomiaru poziomu szumów układu pomiarowego — aby ocenić dokładność metody. Widok okna programu rejestrującego szum przedstawiono na rysunku 5.



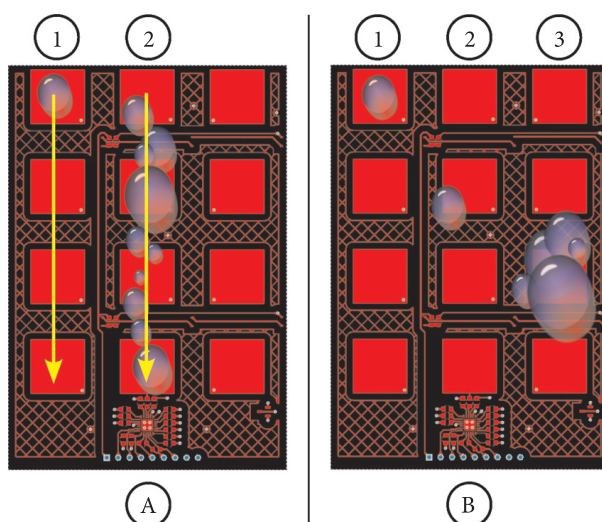
Rys. 5. Sygnał Delta w stanie ustalonym dla pojedynczego detektora wykonanego w technologii MoCT w stanie spoczynku do określenia wartości szumu

4. Wyniki i wnioski

4.1. Pomiar odporności na wodę

Podczas przepływu wody na przycisku typu *self-capacitance* z zewnętrznym materiałem nr 1 przy pojedynczej kropli (rys. 6A pkt 1) sygnał Delta był na poziomie 12 impulsów, natomiast przy większym przepływie (rys. 6A pkt 2) wartości te dochodziły do 35 impulsów. Wpływ wody stojącej jest większy i dla pojedynczej kropli w centrum sensora dotykowego (rys. 6B pkt 1) amplituda sygnału jest na poziomie 15 impulsów, przy umiejscowieniu pojedynczej kropli na krawędzi detektora (rys. 6B pkt 2) 40 impulsów, natomiast naniesienie wody na powierzchnię całego sensora (rys. 6B pkt 3) generowało sygnał o amplitudzie 120 impulsów. Spowodowane jest to wysoką przewodnością oraz przenikalnością dielektryczną wody.

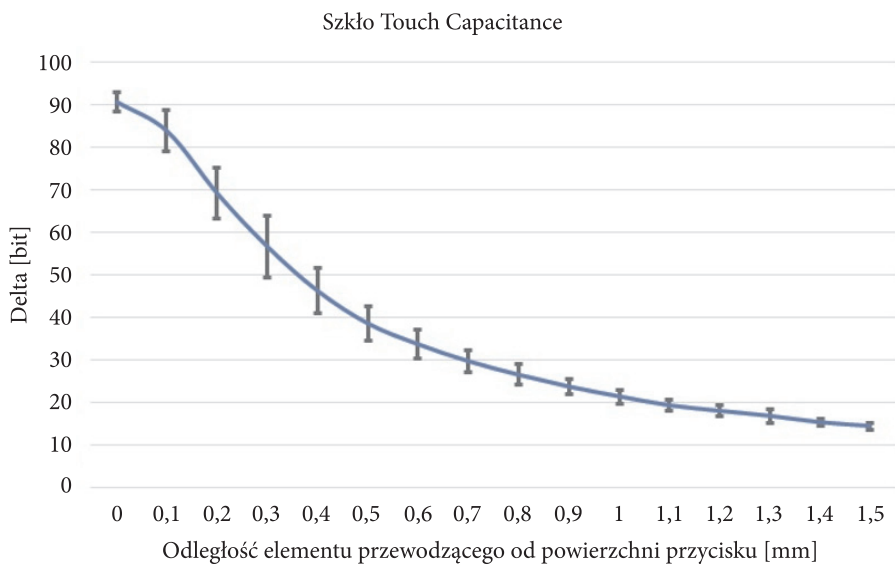
Przyciski dotykowe wykonane w technologii MoCT są całkowicie niewrażliwe na wpływ wody zarówno stojącej, jak i płynącej, a sygnał wyjściowy przetwornika mikrokontrolera to sygnał na poziomie szumów, czyli ± 1 impuls. Eksperyment ten potwierdza problem występujący w klasycznych przyciskach pojemnościowych, który został wyeliminowany w przyciskach dotykowych typu MoCT.



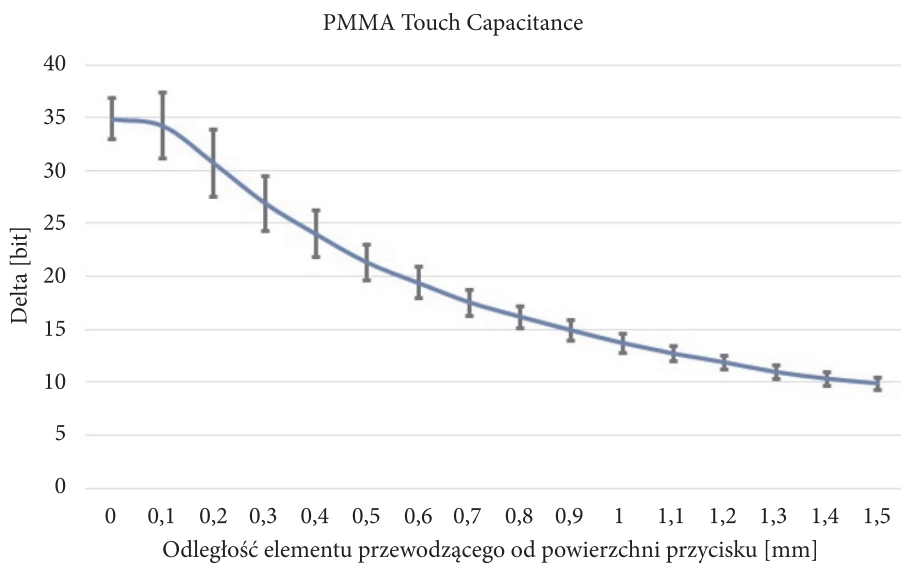
Rys. 6. Wpływ wody na sensory pojemnościowe: A — wpływ wody spływającej: 1 — pojedyncza kropla, 2 — strumień; B — wpływ wody stojącej: 1 — pojedyncza kropla w centrum sensora, 2 — pojedyncza kropla na krawędzi sensora, 3 — woda na całej powierzchni sensora

4.2. Czułość układu

Na wykresie (rys. 7) przedstawiono pomiary wpływu odległości elementu przewodzącego na sensor z dotykową warstwą wykonaną z materiału nr 1 (tabela 1), natomiast na rysunku 8 z dotykową warstwą wykonaną z materiału nr 2. Różnica wartości spowodowana jest względną przenikalnością elektryczną tych materiałów [11], która dla szkła znajduje się w zakresie od 3,8 do 14,5, natomiast dla PMMA od 2 do 5. W czujnikach dotykowych typu MoCT zbliżanie elementu przewodzącego do zewnętrznej powierzchni detektora nie wpływało na detekcję, która wykazywała zmiany wartości na poziomie szumów. Wyniki pomiarów pokazują, że już samo zbliżenie ciała przewodzącego do klasycznego czujnika dotykowego typu TC powoduje zmiany w czasie ładowania zbudowanego kondensatora. Takie zachowanie układu może być zarówno wadą, jak i zaletą, jednak w typowym zastosowaniu w klawiaturze powoduje trudności w prawidłowym ustawieniu progu detekcji.



Rys. 7. Wpływ odległości elementu przewodzącego na materiał szklany w technologii TC wraz z odchyleniem standardowym



Rys. 8. Wpływ odległości elementu przewodzącego na materiał PMMA w technologii TC wraz z odchyleniem standardowym

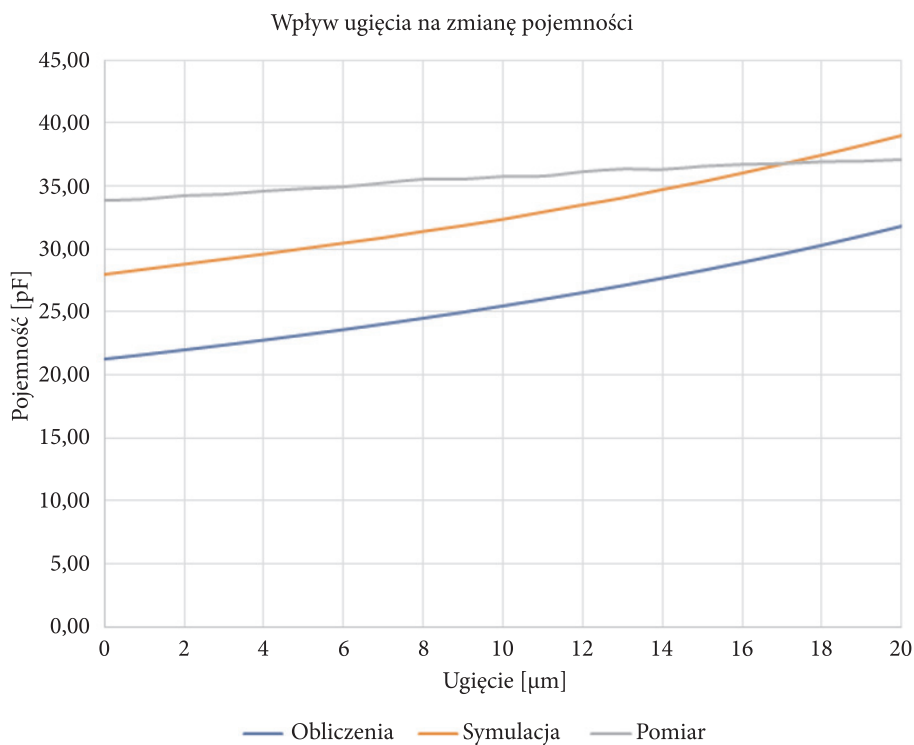
Przykładowo ustawienie progu na małą wartość, w taki sposób, aby wykryć dotyk nawet przez rękawiczki, powoduje zwiększenie ryzyka fałszywej detekcji. W innym przypadku, gdy wartość progu zostanie ustalona w górnej granicy, nie będzie możliwa detekcja dotyku w rękawiczkach oraz zaistnieje ryzyko, że osoba z suchą skórą może mieć problemy z obsługą urządzeń wykorzystujących tego typu klawiaturę. Dodatkowo nie ma możliwości użytkowania klawiatury przez osoby z niepełnosprawnościami, np. osoby niewidome, które muszą klawiaturę dotknąć przed wybraniem przycisku. Tych wad pozbawione są czujniki wykorzystujące technologię MoCT, gdyż pozwala ona na ograniczanie przypadkowych i słabych dotknięć oraz jest odporna na zakłócenia spowodowane samym przybliżeniem ręki.

4.3. Wpływ siły nacisku na detekcję dotyku

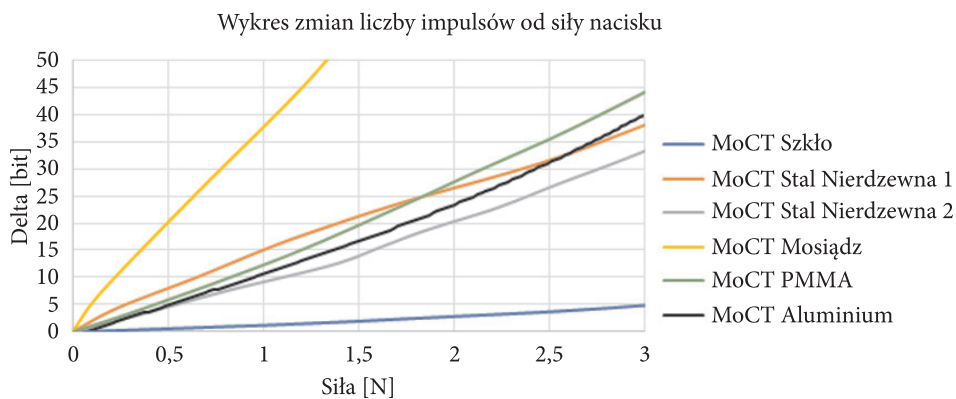
Najważniejszym parametrem z punktu widzenia właściwości użytkowych przycisku jest charakterystyka sygnału wyjściowego w funkcji siły nacisku. Siła ta była mierzona czujnikiem tensometrycznym i zmieniała się wraz z regulacją położenia imitatora dotyku regulowaną śrubą mikrometryczną.

Na rysunku 9 widoczne są różnice pojemności uzyskane w wyniku symulacji, obliczeń i pomiaru. Wykresy obliczonych oraz zasymulowanych pojemności mają podobny charakter. Różnice między nimi wynikają z tego, że we wzorze uwzględniana jest tylko powierzchnia samego detektora, natomiast w symulacji brana jest pod uwagę powierzchnia wszystkich połączeń w obwodzie drukowanym oraz pojemności pomiędzy nimi. Różnice pojemności mierzonych względem wyników symulacji wynikają ze sposobu ugięcia materiału — przy nacisku materiał odkształca się eliptycznie, więc powierzchnia okładek nie jest równoległa, jak przyjęto dla obliczeń w symulacji. Dodatkowy wpływ mają odkształcenia całego urządzenia pomiarowego. Nachylenie charakterystyki pojemności jest dużo mniejsze od wartości obliczonych i zasymulowanych i zwiększa się o 10% w stosunku do początkowej pojemności. Jest to poziom umożliwiający nie tylko detekcję wciśnięcia przycisku, lecz także określenie wielkości ugięcia, co pozwala na rozróżnienie wielu poziomów nacisku.

Z analizy ofert dostępnych mikroprzełączników typu TACT (klasyczne przyciski mechaniczne) oraz typu membranowego wynika, że typowa siła nacisku przycisków mechanicznych rozpoczyna się od 0,5 N dla klawiszy „dotykowych”, 1,6 N dla standardowych klawiszy i aż do 9 N dla przycisków typu *hard*.



Rys. 9. Wpływ ugięcia frontu MoCT na pojemność sensora



Rys. 10. Wpływ siły nacisku na pomiar Delta

Siła wymagana do detekcji dla przycisków pojemnościowych wykonanych w technologii MoCT (rys. 10) jest zależna od ustalonego progu detekcji oraz budowy samego detektora. Biorąc pod uwagę szum na poziomie dwóch impulsów sygnału Delta, ustalono detekcję na poziomie czterech impulsów. Stan włączenia (aktywacji) dla różnych materiałów otrzymany został przy następujących wartościach użytej siły: mosiądz — 0,10 N, stal nierdzewna H17 — 0,20 N, PMMA — 0,35 N, stal nierdzewna H18 — 0,45 N, aluminium — 0,55 N, szkło — 2,65 N. Większość zbadanych materiałów wymaga podobnej lub mniejszej siły do aktywacji w porównaniu do klasycznych przycisków mechanicznych udających przyciski dotykowe. Jedynie siła wymagana do ugięcia szkła jest porównywalna do standardowych przycisków o wymaganej normalnej sile nacisku. W celu zmiany czułości poszczególnych sensorów można zmienić następujące parametry: próg aktywacji, dystans pomiędzy okładkami, grubość frontu klawiatury, dielektryk wykonanego kondensatora.

4.4. Wnioski

Detektory typu MoCT są tanią i efektywną alternatywą dotykowych sensorów nacisku, dodatkowo oferują nowe funkcjonalności, takie jak np. pomiar siły nacisku niedostępny w tradycyjnych czujnikach pojemnościowych. Są stosunkowo proste i szybkie w projektowaniu oraz budowie. Oferują możliwość zastosowania frontu zewnętrznego zbudowanego z przewodnika lub izolatora z przewodzącym podkładem, dzięki czemu następuje separacja elektryczna urządzenia od otoczenia. Rozwiązanie MoCT zwiększa czułość, zmniejsza wrażliwość na przypadkowe przyciśnięcia oraz na warunki środowiskowe, umożliwia użytkowanie przez osoby z niepełnosprawnościami. Eliminuje również konieczność dotyku przez ciało konduktywne, ponieważ wpływ na zmianę pojemności ma tylko zmiana odległości pomiędzy okładkami będącymi integralną częścią przycisku.

Brak ruchomych elementów mechanicznych znacząco wydłuża czas bezawaryjnej pracy klawiatur wykorzystujących tę technologię w porównaniu z klasycznymi przyciskami mechanicznymi. Możliwość wykonania obudowy z materiałów metalowych zwiększa wytrzymałość urządzenia na udary mechaniczne. Takie urządzenie będzie miało cechy wandaloodporności, będzie też dobrym rozwiązaniem dla urządzeń wojskowych — w tym tych wymagających hermetycznej obudowy, np. przyrządów optoelektronicznych. Brak konieczności wycinania otworów na fizyczne przyciski we froncie klawiatury, który może być wykonany z izolatora, ułatwia zachowanie higieny oraz pozwala na wykorzystanie w urządzeniach medycznych. Możliwość regulacji wymaganej siły nacisku przez zmianę progu detekcji przycisków wykonanych w technologii MoCT pozwala na wykorzystanie w urządzeniach użyteczności publicznej, w szczególności tych użytkowanych przez osoby z wadami wzroku lub z ograniczoną motoryką.

Najwięksi producenci elektroniki (Microchip, STMicroelectronics, Infineon Technologies, Texas Instruments) oferują obsługę pojemnościowych sensorów dotykowych wbudowaną bezpośrednio w mikrokontrolery — można je zastosować do obsługi przycisków MoCT, co znacząco obniża koszty produkcyjne.

Przeprowadzone badania pozwalają na dobór skutecznie działających materiałów konstrukcyjnych dla przycisków MoCT w zależności od wymaganych parametrów użytkowych (jak siła nacisku) i konstrukcyjnych (wymagana grubość — wytrzymałość) materiału panelu dotykowego. Analiza porównawcza danych empirycznych i wyników symulacji przeprowadzonych w dostępnym komercyjnie oprogramowaniu pozwala na przyspieszenie procesu projektowania tego typu przycisków i wprowadzenie odpowiednich poprawek do wyników symulacji w procesie projektowania docelowego urządzenia.

Praca była współfinansowana w ramach realizacji projektu: *Opracowanie terminali z ekranem w technologii E ink przystosowanych do transmisji danych z urządzeń bazowych*. Projekt realizowany przy wsparciu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, nr projektu POIR.01.01.01-00-0119/18, z udziałem środków finansowych UE na wsparcie prowadzenia prac badawczo-rozwojowych przez przedsiębiorstwa.

Artykuł opracowany na podstawie referatu zaprezentowanego na XXXVI Konferencji Elektroniki, Telekomunikacji i Energetyki Studentów i Młodych Naukowców SECON 2022 — zorganizowanej przez Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie w dniach 26-27 kwietnia 2022 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 31.05.2022. Zatwierdzono do publikacji 8.02.2023.

Mariusz Mścichowski <https://orcid.org/0000-0002-0079-1960>

Grzegorz Bieszczad <https://orcid.org/0000-0001-8048-2609>

LITERATURA

- [1] <https://patents.google.com/patent/US2810066?q=us2810066a> [dostęp: 9.12.2022].
- [2] ANWER A.H., KHAN N., ANSARI M.Z., BAEK S.-S., YI H., KIM S., NOH S.M., JEONG C., *Recent Advances in Touch Sensors for Flexible Wearable Devices*, *Sensors*, 22, 12, 2022, 4460, <https://doi.org/10.3390/s22124460>.
- [3] MALIK M.S., ZULFIQAR M.H., KHAN M.A., MEHMOOD M.Q., MASSOUD Y., *Facile Pressure-Sensitive Capacitive Touch Keypad for a Green Intelligent Human-Machine Interface*, *Sensors*, 22, 21, 2022, 8113, <https://doi.org/10.3390/s22218113>.
- [4] OATLEY G., CHOUDHURY T., BUCKMAN P., *Smart Textiles for Improved Quality of Life and Cognitive Assessment*, *Sensors*, 21, 23, 2021, 8008, <https://doi.org/10.3390/s21238008>.
- [5] DONTA B., SWEARINGEN K., SWEARINGEN S., THRANE S.E., KIOURTI A., *Wearable Sensors Based on Force-Sensitive Resistors for Touch-Based Collaborative Digital Gaming*, *Sensors*, 22, 1, 2022, 342, <https://doi.org/10.3390/s22010342>.
- [6] VOLPE R., IVLEV R., *A Survey and Experimental Evaluation of Proximity Sensors for Space Robotics*, *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, 1994, pp. 3466-3473, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1994.351037>.

- [7] PORINS R., Apse-Apsitis P., Grinfogels E., *Human Body Influence on a Parallel Plate Capacitance*, 2019 International Symposium ELMAR, 2019, pp. 175-178, <https://doi.org/10.1109/ELMAR.2019.8918657>.
- [8] CURTIS K., PETER D., *mTouch™ Metal Over Cap Technology*, Microchip Technology Inc., 2010, <https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/01325A.pdf>, [dostęp: 9.12.2022].
- [9] Atmel Data Visualizer, Microchip, <https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/debug/atmel-data-visualizer>, [dostęp: 9.12.2022].
- [10] <https://capext.com>, [dostęp: 9.12.2022].
- [11] Dielectric Constant, Omnexus, <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/dielectric-constant>, [dostęp: 9.12.2022].

M. MŚCICHOWSKI, G. BIESZCZAD, P. HORBACZEWSKI

Comparative analysis of selected performance parameters of capacitive touch sensors

Abstract. In the article, various types of touch buttons are presented and compared, including standard self-capacitance buttons and Metal over Cap Technology (MoCT) buttons which work through the deflection of the additional covering conductive layer.

Two types of touch buttons have been simulated. Standard self-capacitance buttons have been simulated using built-in CapExt software standard capacitive sensors models while for MoCT buttons, a specially designed simulation model has been developed, which has made a simulation of phenomena occurring in the sensors manufactured in this technology possible. Furthermore, two physical models of capacitive buttons have been designed and constructed. The parameters of both buttons have been tested and compared with the simulated results. There is a presentation of a specifically designed and constructed tool which allows simulating a touch event with high accuracy and repeatability. Test results of the touch force required to activate the sensor, created in the MoCT technology, are presented and the results are compared against the parameters of classic mechanical buttons.

The research has shown that MoCT touch sensors have a high resistance to false detection. The research described in the article allows selecting the effective construction materials for MoCT buttons, depending on the required user parameters such as pressing force and construction parameters such as required panel thickness (strength). A comparative analysis of the empirical data and the results of simulations, conducted with commercially available software, allows accelerating the design process of such buttons and introducing appropriate corrections to the simulation results in the process of designing the final device.

Keywords: capacitive touch sensor, parallel plate type capacitive pressure sensor, capacitive pressor sensors, sensing performance

DOI: 10.5604/01.3001.0016.2814

