

System do terapii polem magnetycznym i światłem

Streszczenie. Przedstawiony w artykule system przeznaczony jest do terapii i rehabilitacji fizycznej z zastosowaniem pól magnetycznych i światła do stosowania w placówkach medycznych oraz w warunkach domowych. System składa się ze sterownika wytwarzającego sygnały terapeutyczne, aplikatorów oraz systemu e-zarządzania. Pola magnetyczne wytwarzane w aplikatorach poprzez oddziaływanie prądów o różnych kształtach i polaryzacji znalazły swoje zastosowanie w rehabilitacji i są uznaną formą terapii.

Abstract. The system presented in this paper is designed for physical therapy and rehabilitation, using magnetic fields and lights for use in medical facilities and at home. The system consists of a control unit for generating therapeutic signals, applicators and an e-management system. The magnetic fields created in applicators, through the effects of currents of various shapes and polarization, have found their application in rehabilitation and are a recognized form of therapy. **(System for magnetic field therapy and light therapy).**

Słowa kluczowe: aparatura medyczna, terapia polem magnetycznym, magnetoterapia, magnetostymulacja.

Keywords: medical equipment, magnetic field therapy, magnetotherapy, magnetostimulation.

Wstęp

Pola magnetyczne wytwarzane za pomocą prądów o różnych kształtach i polaryzacji znalazły zastosowanie w medycynie w procesie rehabilitacji pacjentów z różnego rodzaju schorzeniami i są uznaną formą terapii. Wytworzenie sygnałów do terapii polem magnetycznym w formie napięciowej nie jest zbyt skomplikowane, lecz utrzymanie zadanego kształtu prądu, a przez to i indukcji pola magnetycznego nastręcza wielu trudności. Przedstawiony system przeznaczony jest do terapii i rehabilitacji fizycznej do stosowania w placówkach medycznych oraz w warunkach domowych i składa się z:

- sterownika z panelem dotykowym wyposażonego w moduły do zasilania, monitorowania i sterowania pracą aplikatorów do terapii polem magnetycznym i światłem,
- aplikatorów pola magnetycznego i światła,
- systemu e-zarządzania.

Sterownik

Do zadań sterownika należy obsługa funkcji takich jak:

- generowanie sygnałów terapeutycznych o odpowiednim kształcie, amplitudzie, polaryzacji pola magnetycznego,
- generowanie sygnałów sterujących aplikatorami do terapii światłem LED,
- samokontrola działania poszczególnych obwodów urządzenia,
- diagnostyka poszczególnych typów aplikatorów i ich wizualizacja na ekranie,
- sygnalizacja stanu działania aparatury, sygnalizacja akustyczna i optyczna,
- kontrola czasu trwania aplikacji oraz bieżący podgląd czasu do końca zabiegu,
- automatyczne wyłączenie aparatury po zabiegu lub w przypadku stwierdzenia nieprawidłowości działania któregoś z obwodów.

Schemat blokowy sterownika został przedstawiony na rysunku 1. Do generacji sygnałów zastosowano procesor STM32F103RE z 512kB flash i 64kB RAM. Spróbowane sygnały terapeutyczne znajdują się w pamięci nieulotnej procesora, który poprzez kanał bezpośredniego dostępu do pamięci DMA przesyła dane do 12 bitowego przetwornika C/A. Ilości próbek dobrano w ten sposób, aby możliwe było wytwarzanie sygnału z minimalnym zaangażowaniem samego procesora. Układ wizualizacji składa się z wyświetlacza RK070CU01-CT z interfejsem LVDS i modułu do obsługi interfejsu użytkownika PICO-IMX6U 10R1N14G

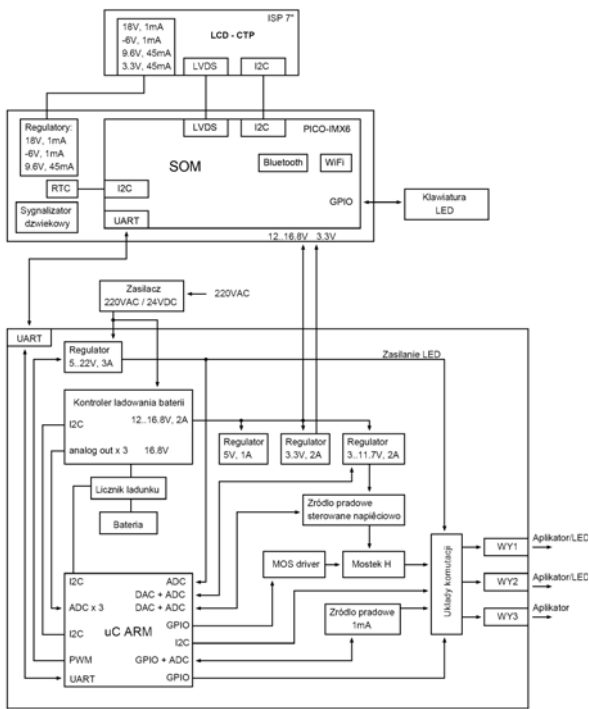
firmy TechNexion. Omawiany układ zawiera dwurdzeniowy procesor wykonany w technologii ARM Cortex-A9 pracujący z częstotliwością zegara 1 GHz i pamięcią RAM DDR3 o pojemności 1 GB oraz pamięć nieulotną 4GB eMMC. Zakres temperatur pracy modułu wynosi od 0 do 60°C. Moduł SoM montowany jest na płytce 4 warstwowej, zawierającej gniazda przyłączeniowe, porty LVDS i I2C do przyłączenia wyświetlacza i klawiatury dotykowej oraz regulatory napięć wymaganych do zasilania wyświetlacza, podświetlenia i sterownika klawiatury. Moduł SoM komunikuje się z procesorem części wykonawczej za pośrednictwem magistrali szeregowej UART. Moduł SoM umożliwia zarządzanie zewnętrznymi modułami komunikacyjnymi WiFi i Bluetooth. Zadaniem układu sterowania i wizualizacji jest realizacja następujących funkcji:

- zapewnienie komunikacji z użytkownikami o różnych poziomach uprawnień,
- sterowanie wyświetlaczem oraz panelem dotykowym,
- wymiana danych w ramach interfejsu użytkownika oraz odpowiednich protokołów transmisji,
- połączenie z Internetem za pomocą sieci bezprzewodowej WiFi,
- wymiana danych za pomocą łącza radiowego Bluetooth.

Diagnostyka aplikatorów

Sterownik obsługuje aplikatory różnych typów. Są to aplikatory do: magnetoterapii, magnetostymulacji, ledoterapii, magnetoledoterapii. Diagnostykę aplikatorów można podzielić na: badanie ciągłości obwodu aplikatora, badanie rodzaju aplikatora, odczyt parametrów aplikatora LED, rozpoznanie zwarcia w obwodach LED.

Diagnostyka ciągłości aplikatora dotyczy obwodów do magnetoterapii i magnetostymulacji. Metoda ta polega na wytworzeniu w układzie pomiarowym sygnału prądowego „Test” o wartości około 40 mA, który przepływa przez obwód aplikatora. Wbudowany układ kontroli obciążenia wykonuje pomiary w sposób ciągły przed terapią i nie pozwala załączyć sterownika bez obciążenia. Natomiast podczas pracy magnetostymulacji pomiary są wykonywane rzadziej np. co 10 s. Podczas pracy magnetoterapii nie jest możliwy pomiar oporności ze względu na ciągły sygnał terapeutyczny, toteż awaria aplikatora jest identyfikowana jako zanik wartości rezystancji w obwodzie rezystora kodującego typ aplikatora.



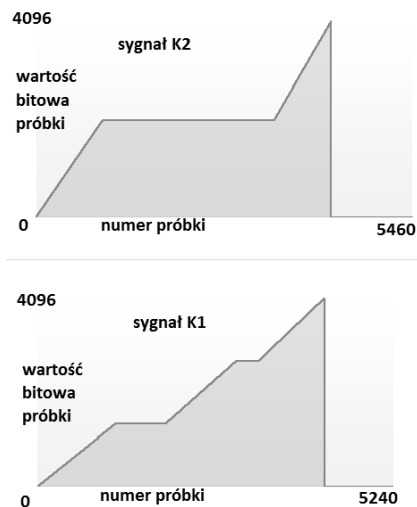
rys 1. Schemat blokowy sterownika

Diagnostyka rodzaju aplikatora ma na celu kontrolę podłączenia aplikatorów do gniazd wyjściowych oraz określenie ich rodzaju. Diagnostyka aplikatorów jest prowadzona dwoma metodami. Metoda pierwsza polega na odczycie spadku napięcia na rezystorze kodującym, zasilanym ze skompensowanego termicznie źródła prądowego o wydajności 1 mA. Dotyczy to aplikatorów do magnetostymulacji i magnetoterapii. Są to aplikatory o różnej indukcyjności i rezystancji. Rezystor kodujący może mieć wartość z zakresu od 100 Ω do 3000 Ω. Metoda druga polega na odczycie konfiguracji zapisanej w pamięci EEPROM odczytywanej za pomocą magistrali I2C. Ten rodzaj kodowania ma zastosowanie dla aplikatorów stosowanych w ledoterapii. Sterownik odczytuje z pamięci EEPROM dane konfiguracyjne do ledoterapii. Wymaga się, aby był możliwy odczyt mocy promieniowania na centymetr kwadratowy (P/cm^2) oraz długości fali promieniowania światła. Ze względu na zasilanie napięciowe aplikatorów do ledoterapii, ważne jest użycie odpowiedniego napięcia dla danej matrycy diod LED. Parametry te są zapisane w pamięci EEPROM aplikatora.

Wytworzenie sygnałów do terapii polem magnetycznym i światłem

W magnetoterapii stosuje się sygnały o kształcie sinusoidalnym, trójkątnym i prostokątnym z zakresu częstotliwości od 5 do 40 Hz. W terapii polem magnetycznym i światłem stosuje się sygnały do magnetostymulacji [1], [2], [3], [4], gdzie realizowany jest program P3 i aplikacja M1 z możliwością ustawienia intensywności pola magnetycznego i czasu trwania terapii polem magnetycznym. Terapia ta może odbywać się w sposób synchroniczny lub asynchroniczny z terapią światłem. W terapii światłem nazywanej też ledoterapią stosowane są aplikatory w formie paneli LED. Możliwa jest regulacja intensywności świecenia panelu za pomocą zmiany wypełnienia sygnału sterującego z wykorzystaniem regulatora PWM sterującego kluczem MOS. W sterowniku oblicza się i wyświetla parametry ledoterapii takie jak: długość fali, całkowita energia promieniowana, średnia moc

na cm^2 , czas realizacji zabiegu, kontrola rodzaju i ciągłości aplikatora. Sygnały odwzorowujące zdefiniowane kształty przebiegów powstają z próbek przechowywanych w pamięci nieulotnej mikrokontrolera. Próbkę są przeskalowywane zgodnie z parametrami magnetoterapii lub magnetostymulacji i podane na wejście wewnętrznej przetwornika cyfrowo analogowego DAC z częstotliwością wynikającą z parametrów terapii. Źródło prądowe jest sterowane sygnałem analogowym z przetwornika DAC i generuje sygnał prądowy zasilający aplikator, o kształcie odpowiadającym przebiegowi na wyjściu przetwornika DAC. Jednocześnie wykonywany jest pomiar prądu wyjściowego źródła prądowego w celu pełnej kontroli nad generowanym prądem i eliminacji potencjalnych błędów. Zmiana polaryzacji sygnałów następuje w mostku H. Zasilanie źródła prądowego stałym napięciem powoduje, że na elemencie wykonawczym źródła prądowego odkłada się napięcie będące różnicą pomiędzy napięciem zasilającym a odkładającym się na aplikatorze. Powoduje to straty mocy na elemencie wykonawczym źródła prądowego, prowadzące do wzrostu temperatury i znacznego zmniejszenia efektywności wykorzystania energii z baterii. Aby uniknąć powyższych efektów zdecydowano się zastosować zmienne zasilanie źródła prądowego, realizowane za pomocą impulsowego regulatora napięcia o regulowanym napięciu wyjściowym za pomocą sygnału analogowego przetwornika DAC ustawianego z mikroprocesora sterującego. Procesor uwzględnia charakterystykę prądowo napięciową aplikatora przewiduje napięcie potrzebne do jego zasilenia, uwzględniając kształt impulsów i ustawia stosowną wartość napięcia wyjściowego regulatora impulsowego. Przykładowe sygnały stosowane w magnetostymulacji zostały przedstawione na rysunku 2.



Rys.2. Przykładowe sygnały stosowane w magnetostymulacji

Wpływ indukcyjności aplikatora na pracę sterownika

Prawo indukcji elektromagnetycznej (Prawo Faradaya) mówi, że siła elektromotoryczna (E) powstająca w zamkniętym obwodzie w wyniku indukcji elektromagnetycznej jest proporcjonalna do szybkości zmian strumienia wektora indukcji magnetycznej obejmowanego przez ten obwód.

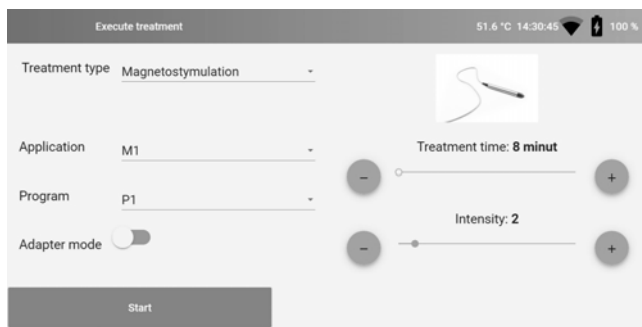
$$(1) \quad E = -d\phi/dt$$

gdzie: E – siła elektromotoryczna, $d\phi/dt$ – zmiana strumienia wektora indukcji magnetycznej w czasie.

Znak minus jest konsekwencją działania prawa Lenza, które mówi, że zaindukowane napięcie (E) przeciwstawia się zanikowi, lub wzrostowi prądu płynącego w obwodzie aplikatora pola magnetycznego. Z fizycznego punktu widzenia reguła ta wynika z zasady zachowania energii. Indukcja, a przez to strumień indukcji magnetycznej jest zależny proporcjonalnie do prądu płynącego w obwodzie aplikatora. Zaindukowane na zaciskach aplikatora napięcie zależy od kierunku i szybkości zmian prądu płynącego w aplikatorze, co oznacza, że szybkie zmiany powodują zaindukowanie dużego napięcia przeciwstawiającego się wywołanym zmianom. Dla zachowania prostokątnego przebiegu prądu, zaindukowane napięcia musiałyby być nieskończenie duże. W praktyce zaindukowane napięcie należy ograniczyć, zarówno ze względów bezpieczeństwa pacjentów i personelu, jak i względu na zabezpieczenie wyjścia sterownika przed uszkodzeniem. Zabezpieczeniem są diody zabezpieczające kierujące zaindukowane napięcie powyżej napięcia zasilającego do źródła zasilania powodując przez to odzysk energii. Można również ograniczyć napięcie na elementach zabezpieczających typu dioda Zenera lub tranzil. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że zniekształcenie sygnału prądowego zależy od napięcia zasilającego. Należy zatem zapewnić taki algorytm sterowania regulatorem impulsowym zasilającym źródło prądowe aby w przypadku ostrych zboczy sygnałów zapewnić wystarczający, chwilowy wzrost napięcia, w zakresie, w którym jest to możliwe.

Interfejs użytkownika

Interfejs użytkownika pozwala na ustawianie i wizualizację parametrów przygotowywanej terapii. Oprócz sygnalizacji optycznej jest również w sterowniku zaimplementowana sygnalizacja akustyczna, która informuje głosowo o rozpoczęciu i zakończeniu terapii związanej z określonym wyjściem. Sygnalizacja akustyczna może być również włączona dla sygnalizacji trwania terapii. Wbudowana trójprzyciskowa klawiatura membranowa z przetłoczeniami ułatwia nawigację w menu urządzenia dla osób niedowidzących lub ociemniałych. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe okna menu związane z interfejsem użytkownika.



Rys. 3. Przykładowe okno menu związane z interfejsem użytkownika

System zasilania

Sterownik wraz z aplikatorami może pracować z zasilaniem sieciowego lub baterijnego. Do baterii podłączony jest układ licznika ładunku, który mierzy poziom naładowania lub rozładowania baterii i przekazuje informację o nim do procesora. Procesor mając tę informację może określić czy zgromadzona w baterii energia jest wystarczająca do przeprowadzenia pełnego zabiegu magnetostymulacji i podjąć odpowiednie działania. Ładowaniem baterii i załączaniem jej do systemu steruje kontroler ładowania baterii, zintegrowany z układem regulatora impulsowego, który ustala napięcie ładowania i

napięcie zasilania całego systemu. Informacje o prądzie, napięciu i mocy przesyłane są do procesora w formie sygnałów analogowych i mierzone są przez procesor przetwornikiem ADC. Sygnały prądowe do zasilania aplikatorów wytwarzane są w układzie źródła prądowego zasilanego z napięcia o dodatniej polaryzacji podawanego z regulatora 4-11,7 V. Aby zapewnić możliwość generowania sygnałów o ujemnej polaryzacji lub sygnałów naprzemiennych, zastosowano układ mostka H do zmiany polaryzacji sygnałów zasilających. Mostek H jest sterowany procesorem za pośrednictwem układu MOS driver. Układy komutacji sterowane wyjściami GPIO procesora umożliwiają przyłączenie sygnałów wyjściowych do odpowiedniego złącza wyjściowego. Z przeprowadzonych badań wynika, że zasilanie baterijne zdecydowanie ogranicza górną wartość rezystancji aplikatora do magnetoterapii lub magnetostymulacji. W zależności od przyjętego rozwiązania rezystancja ta może wynosić od 4,7 Ω do 6,1 Ω . W przypadku zasilania sieciowego maksymalna rezystancja aplikatora może wynosić 7,3 Ω . Należy to uwzględnić dla pojedynczego aplikatora, jak i rozwiązań wykorzystujących dwa połączone szeregowo aplikatory.

Przyjęto następujące założenia dotyczące parametrów pracy aplikatorów:

- maksymalny szczytowy prąd pracy $I=1,8\text{ A}$,
- maksymalna rezystancja szeregowo pojedynczego aplikatora $RS1=5\ \Omega$,
- maksymalna rezystancja szeregowo dwóch połączonych szeregowo aplikatorów $RS2=7\ \Omega$.

Zatem pojedynczy aplikator wymaga zasilania $U1_{min}=1,8\text{A}\cdot5\Omega=9\text{V}$, zaś dwa podłączone szeregowo $U2_{min}=1,8\text{A}\cdot7\Omega=12,6\text{V}$.

System e - zarządzania

Funkcja e-zarządzania pracą sterownika realizuje zdalny interfejs urządzenia zapewniający zdalny dostęp do aktualnego stanu urządzenia, zdalne nastawianie parametrów terapii oraz zdalne uruchamianie i zatrzymywanie procesu terapii. Funkcja ta ma na celu ułatwienie obsługi wielu urządzeń terapeutycznych znajdujących się w gabinetach świadczących usługi fizykoterapii a także urządzeń pojedynczych znajdujących się u użytkowników indywidualnych chcących sterować procesem terapii za pomocą urządzeń mobilnych takich jak smartfon lub tablet. Ze względu na konieczność zapewnienia izolacji galwanicznej sterownika od sieci zasilającej a także minimalizację ograniczeń związanych z miejscem zainstalowania urządzenia do pracy dostęp zdalny do sterownika najlepiej jest zrealizować za pomocą interfejsów komunikacji bezprzewodowej takich jak Wi-Fi lub Bluetooth. Przedstawiony system informatyczny charakteryzuje się wielowarstwową architekturą opartą o rozwiązania stosowane w systemach rozproszonych, w których można wyróżnić wiele bloków sterujących o zdefiniowanej, ściśle określonej funkcjonalności. Bloki te posiadają cechę autonomiczności działania. W systemie e-zarządzania możliwe są role Administratora i Gabinetu lub lekarza. Rola Administratora sprowadza się do:

- zarządzania wypożyczaniem zestawów (sterownika i aplikatorów),
- zarządzania zestawami dostępnymi w systemie poprzez udostępnianie wbudowanych zasobów,
- aktualizacji oprogramowania,
- monitoringu urządzeń widocznych w systemie,
- zarządzaniem bazą wiedzy.

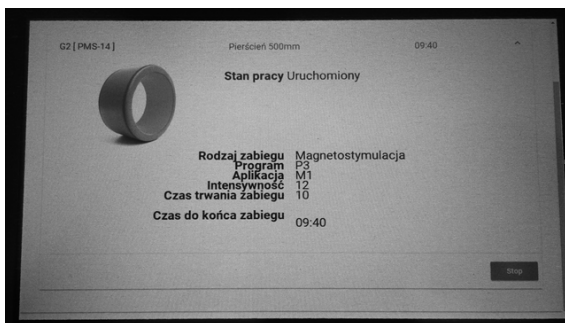
Rola Gabinetu lub lekarza sprowadza się do:

- lokalnej i zdalnej konfiguracji sterowników w gabinecie i domu pacjenta,

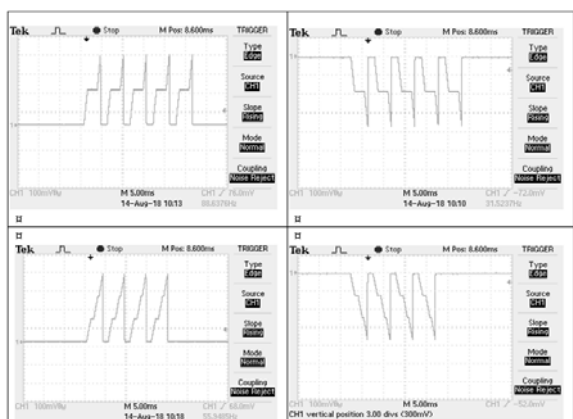
- zarządzania prowadzeniem zabiegów i terapii w gabinecie i domu pacjenta,
- zdalnym nadzorem nad zabiegami wykonywanymi w domu pacjenta,
- korzystania z bazy wiedzy dla prawidłowego doboru terapii.

Wymagania normatywne dotyczące aparatury medycznej [5]

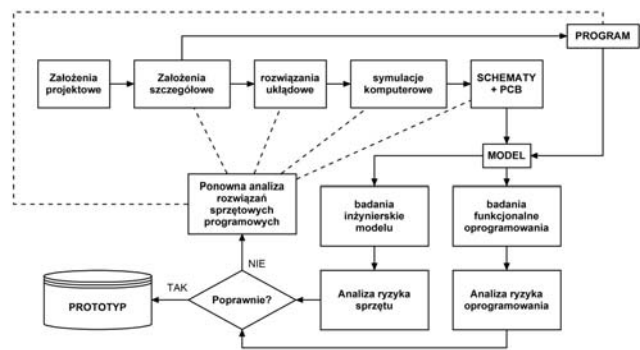
Sterownik jest wyrobem medycznym zawierającym obwody elektroniczne i oprogramowanie konieczne do jego właściwego funkcjonowania przewidzianego przez wytwórcę, który ma być używany w odniesieniu do ludzi do celów terapii i rehabilitacji polem magnetycznym i światłem. Sterownik jako wyrób medyczny podlega dyrektywie MDD 93/42/EWG która przywołuje wymagania dotyczące badań środowiskowych. W sterowniku zastosowano obwody związane z transmisją danych Bluetooth oraz WiFi dlatego też podlegają one również dyrektywie RED 2014/53/UE. Według wymagań przywołanych dyrektyw i norm PN-EN 60601-1:2011, PN-EN 60601-1-2:2015 sterownik podlega badaniom środowiskowym między innymi kompatybilności elektromagnetycznej. W tym zakresie badania dotyczą zarówno emisji jak i odporności elektromagnetycznej według normy. Ocenie podlegają również badania wpływu temperatury na działanie sterownika. Dla systemu przeprowadzono analizę ryzyka i nim zarządzania. Analiza dotyczyła sprzętu i oprogramowania. Przeprowadzono również analizę inżynierii użyteczności dla systemu jako wyrobu medycznego. Badania te dotyczyły norm: PN-EN ISO-14971:2012, PN-EN 62304:2010, PN-EN 62366-1:2015.



Fot. 1. Okno z menu interfejsu użytkownika



Rys. 4. Wyniki pomiarów oscyloskopowych prądu płynącego przez aplikator



Rys. 5. Cykl realizacji systemu od założeń projektowych do prototypu

Pomiary

Dla sprawdzenia poprawności działania sterownika przeprowadzono badania kontrolne wytworzonych sygnałów prądowych płynących przez aplikator pierścieniowy pola magnetycznego w formie cewki Helmholtza. Widok okna z menu interfejsu użytkownika przedstawiono na fotografii 1, a wyniki pomiarów oscyloskopowych przedstawiono na rysunku 4.

Podsumowanie

System był realizowany w ramach projektu począwszy od założeń projektowych poprzez modelowanie i dobór rozwiązań układowych i programistycznych do prototypu, który po badaniach specjalistycznych według przytoczonych norm i certyfikacji będzie wykorzystywany w procesie wdrażania jako sprzęt medyczny. Na rysunku 5 przedstawiono cykl realizacji systemu od założeń projektowych do prototypu.

Podziękowania

Artykuł powstał w ramach Projektu RPMA.01.02.00-14-6195/16 pod nazwą „Wielofunkcyjny system do terapii i rehabilitacji fizycznej, wykorzystujący zaawansowane technologie ICT” finansowanego poprzez: Regionalny Program Operacyjny Województwa Mazowieckiego na lata 2014-2020

Autorzy: mgr inż. Jerzy Chudorliński, Instytut Tele- i Radiotechniczny, Centrum Badawcze Technologii Teleinformatycznych, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa E-mail: jerzy.chudorlinski@itr.org.pl; dr inż. Leszek Książek, Instytut Tele- i Radiotechniczny, Centrum Badawcze Technologii Teleinformatycznych, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa E-mail: leszek.kszajek@itr.org.pl.

LITERATURA

- [1] Mika T., W. Kasprzak W., Fizykoterapia, PZWL Warszawa 2013
- [2] Borczyński J., Chudorliński J., Deka W., Grądzki M. I., Jaroszyk F., Paluszak J., Sieroń A., Sposób uaktywniania transportu jonów i urządzenie do stosowania tego sposobu, Patent nr PL194547 B1
- [3] Chudorliński J., Wlazło P., Sygnały terapeutyczne stosowane w fizykoterapii polem magnetycznym, metody ich wytwarzania oraz analiza, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania (2013) nr.4
- [4] Spiralski L., Galla S., Chudorliński J., System do stymulacji organizmu człowieka wolnozmennym polem magnetycznym Viofor JPS” Elektronizacja : podzespoły i zastosowania elektroniki (2002) nr.4
- [5] Chudorliński J., „Problematyka techniczna i prawna konstrukcji urządzeń automatyki zabezpieczeniowej zgodnych z wymaganiami EMC” Przegląd Elektrotechniczny, 90, (2014) nr.7