



POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ELEKTRONIKI I INFORMATYKI

Praca dyplomowa magisterska

Automatyczny system przygotowywania
mieszanin cieczy

Autor: Sebastian Psujka

Kierujący pracą: dr inż. Józef Wiora

Gliwice, lipiec 2010

Spis treści

Spis tablic	5
Spis rysunków	7
Rozdział 1. Wstęp	9
1.1. Wprowadzenie	9
1.2. Przegląd rozwiązań komercyjnych	10
1.2.1. Oferta firmy Metrohm AG	11
1.2.2. Oferta firmy QMX Laboratories	13
1.2.3. Oferta firmy Hirschmann Laborgerate	14
Rozdział 2. Cel i zakres pracy	17
2.1. Cele oraz stawiane wymagania	17
2.2. Zakres projektu	17
Rozdział 3. Projekt systemu automatycznego przygotowywania mieszanin	19
3.1. Konstrukcja systemu	19
3.2. Dozowniki	19
3.2.1. Pompy dozujące	21
3.2.2. Sygnał sprzężenia zwrotnego	24
3.3. Mieszadło	27
3.4. Sterownik mikroprocesorowy	27
3.4.1. Zasilanie	27
3.4.2. Płyta główna	29
3.4.3. Zasilanie	30
3.4.4. Moduł wejść / wyjść sterownika	32
3.4.5. Komunikacja z komputerem PC	34
3.4.6. Oprogramowanie mikrokontrolera	35
Rozdział 4. Oprogramowanie użytkownika systemu	45
4.1. Idea programu narzędziowego	45

4.2. Funkcje oraz struktura interfejsu graficznego	45
4.2.1. Uwierzytelnianie użytkownika	46
4.2.2. Główna aplikacja	47
4.2.3. Konfiguracja substancji	49
4.2.4. Konfiguracja dozowników	50
4.2.5. Konfiguracja komunikacji	51
4.2.6. Projektowanie mieszanin	52
4.2.7. Tryb manualny dozowania	53
4.2.8. Tryb automatyczny	54
4.3. Technologia	54
4.3.1. Narzędzia i oprogramowanie	54
4.3.2. Struktura aplikacji	59
Rozdział 5. Sprawdzanie systemu i walidacja	63
5.1. Walidacja pomp	63
5.1.1. Dokumenty normalizujące	64
5.1.2. Procedury pomiarowe	65
5.2. Analiza danych pomiarowych	67
5.2.1. Błędy pomiaru	67
5.2.2. Szacowanie niepewności	68
5.2.3. Wynik walidacji pompy A	69
5.2.4. Wynik walidacji pompy B	69
5.3. Wnioski	70
Rozdział 6. Wnioski z pracy	71
6.1. Podsumowanie	71
6.2. Propozycja dalszego rozwoju	72
Rozdział 7. Załączniki	75
7.1. Wyniki walidacji pomp	75
Bibliografia	79

Spis tablic

3.1	Zestawienie najważniejszych cech oraz parametrów technicznych pomp miechowych	25
3.2	Parametry zasilacza.	28
3.3	Podstawowe parametry przekaźników.	34
3.4	Struktura rejestrów urządzeń	38
3.5	Parametry transmisji z wykorzystaniem interfejsu RS-232	41
3.6	Lista funkcji dostępnych w obrębie protokołu.	42
5.1	Przegląd norm obejmujących zagadnienia z zakresu urządzeń dozujących.	65
5.2	Średnie wartości błędów dla pompy A.	69
5.3	Wyniki szacowania niepewności dla pompy A.	69
5.4	Średnie wartości błędów dla pompy B.	69
5.5	Wyniki szacowania niepewności dla pompy B.	70

Spis rysunków

1.1	Pipeta dozująca ręczna firmy PZ HTL S.A.	11
1.2	System dozowników „Dosino” firmy Metrohm AG	12
1.3	Wizja kompletnego modularnego systemu dozowania wg. Metrohm AG	13
1.4	System dozowania „ProLiquid DuoDispenser”	14
1.5	System „Opus dispenser”	15
3.1	Schemat ideowy systemu dozowania.	20
3.2	Podstawowy podział pomp	22
3.3	Rysunek techniczny pompy	23
3.4	Fazy pojedynczego cyklu pompy	24
3.5	Charakterystyka momentów silnika w zależności od napięcia zasilania	25
3.6	Sposób mocowania czujnika krańcowego	26
3.7	Schemat blokowy sterownika	28
3.8	Fotografia wykonanego sterownika. Widok przed ostatecznym montażem.	29
3.9	Schemat elektryczny płyty głównej	30
3.10	Schemat elektryczny modułu wejść / wyjść	33
3.11	Budowa przekaźnika półprzewodnikowego	34
3.12	Schemat elektryczny toru komunikacji szeregowej	36
3.13	Schemat przewodu komunikacyjnego typu null-modem w standardzie RS232	36
3.14	Diagram głównej pętli programu	39
3.15	Wykorzystane warstwy komunikacyjne w odniesieniu do modelu ISO/OSI	41
3.16	Ramka komunikacyjna protokołu	42
4.1	Główny podział interfejsu graficznego aplikacji	46
4.2	Okno dialogowe uwierzytelniania użytkowników	47
4.3	Okno główne aplikacji wraz z zakładką projektowania mieszanin cieczy	48

4.4	Diagram kolejnych etapów projektowania i przygotowywania mieszanin cieczy	49
4.5	Okno dialogowe konfiguracji substancji	50
4.6	Okno dialogowe konfiguracji urządzeń dozujących	51
4.7	Okno dialogowe parametryzacji komunikacji szeregowej	52
4.8	Okno główne aplikacji wraz z zakładką automatycznego trybu dozowania	53
4.9	Okno główne aplikacji wraz z zakładką automatycznego trybu dozowania	55
4.10	Model bazy danych	58
4.11	Organizacja modułów kodu aplikacji	59
5.1	Schemat toru pomiarowego realizowanej procedury.	66
5.2	Diagram procedury walidacji metodą masową dla pojedynczej pompy.	67
7.1	Wyniki pierwszej serii dla pompy A.	75
7.2	Wyniki drugiej serii dla pompy A.	76
7.3	Wyniki trzeciej serii dla pompy A.	76
7.4	Wyniki pierwszej serii dla pompy B.	77
7.5	Wyniki drugiej serii dla pompy B.	77
7.6	Wyniki trzeciej serii dla pompy B.	78

Rozdział 1

Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Dzień 16 grudnia 1947, kiedy to dwaj nobliści w dziedzinie fizyki – John Bardeen oraz Walter Houser Brattain zaprezentowali pierwszy tranzystor, stał się początkiem nowej ery w elektronice. To przełomowe wydarzenie wprawiło w ruch potężną maszynę rozwoju technologicznego, pociągając za sobą inne gałęzie techniki. Rozwój ten nie tylko utrzymuje się do dnia dzisiejszego, lecz napędzany solidną myślą naukową podlega cały czas niebywale intensywnej intensyfikacji¹.

Niewątpliwie dziedziną, która w pełni czerpie z dotychczasowych dokonań w elektronice, fizyce, matematyce oraz innych naukach ścisłych, jest automatyka. Jedną z gałęzi automatyki jest jej technologia – inżynieria automatyzacji. Uważa się, iż automatyzacja to kolejny po mechanizacji etap ewolucji techniki [8]. Konieczność jej zaistnienia i wprowadzenia w życie pokierowana była zwiększeniem wymagań co do jakości wykonywanych zwykle przez pracowników zadań. Człowiek jest istotą omylną, pod wpływem zmęczenia popełnia błędy, w skrajnych przypadkach narażając własne życie oraz zdrowie. Automatyzacja pewnych czynności, procesów pozwala wyeliminować czynnik błędów ludzkiego, czyniąc je wydajniejszymi, nadając tym samym człowiekowi nową rolę – nadzorca, operatora [23].

W Zakładzie Pomiarów i Systemów Sterownia prowadzone są badania nad zastosowaniem metod woltamperometrycznych oraz pomiarów elektrodami jonoselektywnymi w przemyśle. Istotnym w procesie przeprowadzanych eksperymentów są testy tychże czujników na wcześniej przygotowanych zestawach substancji. Etap przygotowywania odczynników jest bardzo pracochłonny i zabiera tym samym wiele cennego czasu. Niniejsza praca stanowi propozycję automatyzacji procesu przyrządzania mieszanin cieczy, podejmując tym samym próbę jego optymalizacji pod względem czasu.

¹ Na podstawie informacji zawartych w oficjalnym serwisie Fundacji Nobla dostępnym pod adresem: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1956/

W kolejnych rozdziałach wprowadza się czytelnika w zagadnienie istoty automatyzacji badań eksperymentalnych w odniesieniu do systemów przygotowywania cieczy. Zrealizowany przegląd tychże instalacji w obszarze rynku komercyjnego, daje obraz dzisiejszego ich znaczenia.

W rozdziale 2 scharakteryzowano podstawowe cele i wymagania dotyczące potrzeb względem powstałego projektu. Dla odpowiedniej organizacji pracy wyznaczono również etapy realizacji oraz ich zakres.

Informacje dotyczące przyjętej struktury systemu dozowania zawiera rozdział 3. Omówiono dokładnie warstwę sprzętową projektu, w tym urządzenia dozujące oraz sterownik mikroprocesorowy. Poruszono również tematykę oprogramowania mikrokontrolera oraz implementacji komunikacji.

Rozdział 3 pracy poświęcony jest w pełni oprogramowaniu użytkownika na komputer PC. Zaprezentowano jego podstawowe funkcje oraz możliwości. Przybliżono również warstwę technologiczną aplikacji.

Proces sprawdzania systemu opisany został w rozdziale 4. Podkreślono w nim znaczenie zgodności nominalnych parametrów produkcyjnych z rzeczywistymi również w odniesieniu do norm. Przeprowadzono procedurę walidacji oraz przeanalizowano wyniki uzyskanych pomiarów.

Rozdział 5 stanowi podsumowanie pracy oraz propozycję i kierunki dalszego rozwoju systemu.

1.2. Przegląd rozwiązań komercyjnych

Idea automatycznego systemu przygotowywania mieszanin cieczy nie jest autorskim pomysłem. Systemy tego typu od dawna funkcjonują już we wielu laboratoriach w kraju i na świecie. Są również dostępne na komercyjnym rynku sprzętu laboratoryjnego. Należą one jednak do kategorii drogiego sprzętu. Zwykle na taką inwestycję decydują się duże laboratoria badawcze, gdzie szybkość realizacji i precyzja łącznie mają kluczowe znaczenie. Odpowiednikiem manualnym systemów dozowania są między innymi dozowniki ręczne. Przykładowe rozwiązanie firmy PZ HTL zaprezentowano na Rys. 1.1.

Rozeznanie rynku sprzętu laboratoryjnego, w tym głównie systemów dozowania, miało charakter poznawczy. Istotnym z punktu widzenia realizacji projektu było uzyskanie informacji o podstawowych funkcjach i możliwościach tychże urządzeń. Dokonano również analizy pod względem ich struktury oraz skalowalności. Spośród wszystkich przeglądanych produktów postanowiono zaprezentować trzy wyróżniające się szczególnie.



RYSUNEK 1.1. Pipeta dozująca ręczna firmy PZ HTL S.A.

Na podstawie dokumentacji [33].

1.2.1. Oferta firmy Metrohm AG

Firma Metrohm AG jest szwajcarskim producentem wysokiej klasy osprzętu laboratoryjnego. Jej produkty uważane są za jedne z najlepszych na świecie. W okresie swej działalności firma niejednokrotnie wprowadzała produkty, które stawały się standardem dla innych. Przykładem może być pierwsza biureta tłokowa (1956)².

W swojej ofercie firma Metrohm AG posiada bardzo bogate rozwiązania z dziedziny systemów dozujących i automatycznego przygotowywania roztworów. Jednym z nich jest seria urządzeń „*Dosino*” (700, 800).

Dozowniki serii „*Dosino*” zaprezentowane zostały na Rys. 1.2. Charakterystycznym dla tych urządzeń jest sposób mocowania bezpośrednio na zasobniku. Dostępne komplety przejściówek na różne gwinty pozwalają korzystać nawet z dużych kanistrów. Pompy te

² Informacje na temat producenta dostępne są na firmowej stronie pod adresem: http://www.metrohm.pl/Firma/Metrohm_AG.html



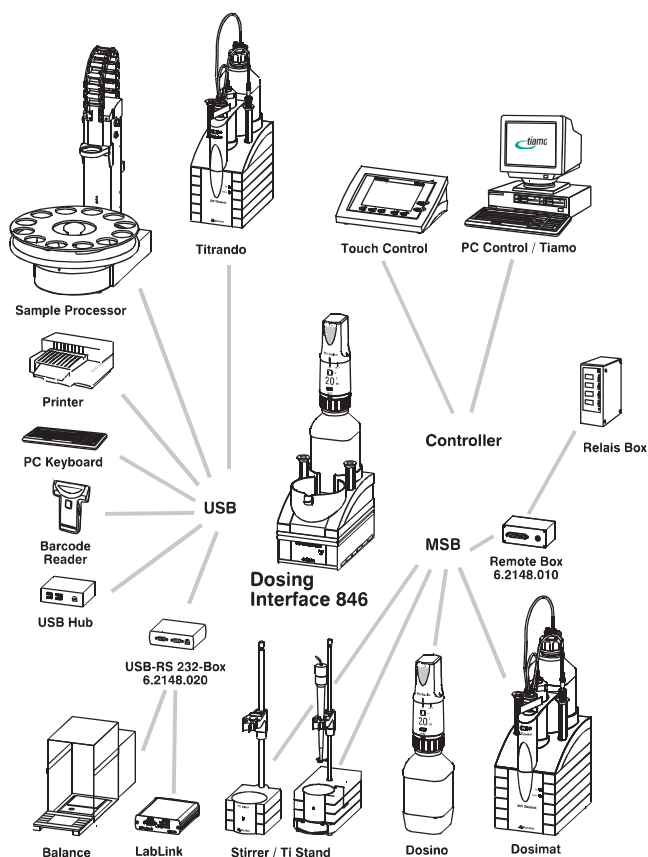
RYSUNEK 1.2. System dozowników „Dosino” firmy Metrohm AG

Na podstawie dokumentacji [24].

pracują w trybie odmierzania stałej objętości substancji w pojedynczym cyklu. Do najważniejszych cech „*Dosino*” należą [24]:

- Element transportujący to tłok poruszający się w cylindrze, napędzany elektrycznym silnikiem krokowym.
- 10000 kroków na jeden etap tłoczny pompy.
- Dokładność zgodna z normą ISO/DIN 8655-3.
- Możliwość doboru i zmiany objętości zestawów tłoczących dla: 2, 5, 10, 20, 50 ml.
- Montaż bezpośrednio na zasobniku.
- Możliwa praca na „sucho”.
- Dodatkowy zawór blokujący dozowanie.
- Opracowana przez Metrohm AG dedykowana procedura walidacji dozowników.

Należy jednak nadmienić, iż zaprezentowane urządzenia dozujące do poprawnej pracy wymagają sterownika systemu dozowania „*Dosing Interface*”. Spełnia on rolę kontroli nad procesem dozowania oraz stanowi źródło zasilania napędu. Z pompami komunikuje się przy pomocy portu MSB natomiast z komputerem PC oraz dedykowanym oprogramowaniem – USB. Rolę nadrzędnej kontroli poza komputerem spełniać może również system wbudowany wraz z panelem dotykowym.



RYSUNEK 1.3. Wizja kompletnego modularnego systemu dozowania wg. Metrohm AG

Na podstawie dokumentacji [24]

Systemy Metrohm AG cechują się bogatą funkcjonalnością i elastycznością. Firma wyraźnie dąży do całkowitej modularyzacji poszczególnych komponentów co zaprezentowano na Rys. 1.3. Dzięki dużej skalowalności zakupioną instalację można dostosować do potrzeb danej aplikacji i poddawać ją dowolnej rekonfiguracji. Warto nadmienić, iż bardzo ciekawą koncepcją jaką rozwija firma jest automatyzacja laboratorium z wykorzystaniem przemysłowych sterowników PLC.

1.2.2. Oferta firmy QMX Laboratories

Nieco inne podejście do przygotowywania mieszanin oraz dozowania ma firma QMX Laboratories z Wielkiej Brytanii. W swej ofercie posiada produkt o nazwie „*ProLiquid DuoDispenser*”. Stanowi on w pełni zautomatyzowany system dozowania składający się



RYSUNEK 1.4. System dozowania „ProLiquid DuoDispenser”

Na podstawie dokumentacji [34]

z dwóch jednostek pompujących. Cały system zamknięto w jednej obudowie – Rys. 1.4. Spośród najważniejszych cech można wymienić:

- Regulacja objętości jednostkowego dozowania w zakresie od 1 μl do 3 ml.
- Dokładność do $\pm 0.5\%$ na każdy ml.
- Wbudowane dwie pompy dozujące z możliwością pełnej ich kontroli z poziomu PDA³.
- Jednostka pompująca napędzana silnikiem krokowym.
- Sterowanie przy pomocy dołączonego urządzenia PDA.
- Posiada 3 tryby dozowania: dozowanie z rozcieńczaniem, tryb normalny dozowania z równoczesną pracą obydwu pomp, tryb ręczny pipety.

1.2.3. Oferta firmy Hirschmann Laborgerate

„Opus dispenser” to urządzenie dozujące niemieckiej firmy Hirschmann Laborgerate. Podobnie jak pompy z serii „Dosino” montowany jest bezpośrednio na zasobniku ze substancją. Sterowanie procesem dozowania, przebiegać może na dwa sposoby. Pierwszy z nich to dedykowany sterownik z wbudowanym, dotykowym wyświetlaczem TFT⁴ – Rys. 1.5.

³ PDA (ang. Personal Digital Assistant) – jest to rodzaj komputera przenośnego, zwykle wielkości dłoni.

⁴ TFT (ang. Thin Film Transistor) – określenie rodzaju tranzystora używanego w produkcji wyświetlaczy ciekłokrystalicznych.



RYSUNEK 1.5. System „Opus dispenser”

Na podstawie dokumentacji [15]

Poza podstawowymi funkcjami parametryzacji odmierzania realizuje również tryb auto-kalibracji dozowanej dawki. Innym sposobem kontroli jest oprogramowanie PC „*Liqui-soft 2.0*”. Koniecznym jest wówczas podłączenie dozownika i panelu do komputera poprzez jeden z interfejsów: RS-232 lub USB. Produkt charakteryzuje się:

- Dokładność $\pm 0.2\%$ na 50 ml.
- Zakres nastawy objętości pompowanej cieczy od 1 ml do 200 ml.
- Cylinder z brązowego szkła chroniący substancje światłoczułe.
- Temperatura pracy od $+4^{\circ}\text{C}$ do $+40^{\circ}\text{C}$.
- Jednostka transportu cieczy w postaci pompy tłokowej.
- Mikroprocesorowy kontroler z dotykowym wyświetlaczem.
- Dedykowane oprogramowanie „*Liqui-soft 2.0*” dające pełną kontrolę nad urządzeniem.

Rozdział 2

Cel i zakres pracy

2.1. Cele oraz stawiane wymagania

Podczas pomiarów stężeń substancji w cieczach wykorzystuje się zestawy wzorców stężeń. Zazwyczaj przygotowywane są one bezpośrednio przed pomiarem. W przypadku, gdy istnieje potrzeba użycia dużej ich liczby, proces ten staje się pracochłonny oraz czasochłonny.

Celem pracy magisterskiej jest zaprojektowanie prototypu systemu automatycznego przygotowywania mieszanin cieczy, skracającego znacząco czas i ułatwiającego proces tworzenia wspomnianych wzorców substancji.

Po przeprowadzeniu przeglądu komercyjnych rozwiązań, o czym wspomniano w poprzednim rozdziale oraz uzgodnieniu potrzeb użytkowników końcowych, wyodrębniono następującą listę pożądanych funkcji powstałego systemu:

Pożądana funkcjonalność systemu:

- Możliwość szybkiego przygotowywania mieszanin cieczy o zadanym składzie i objętości.
- Komunikacja z oprogramowaniem PC lub terminalem (według określonego protokołu) w celu parametryzacji i sterowania procesem dozowania.
- Współpraca z dowolnego rodzaju substancjami (również substancje silnie reagujące).
- Skalowalność systemu oraz oprogramowania.

2.2. Zakres projektu

Zakres wykonanych prac obejmuje:

1. Zaprojektowanie, wykonanie oraz oprogramowanie mikroprocesorowego sterownika pomp dozujących.

2. Napisanie oprogramowania na komputer PC, pełniącego funkcję interfejsu użytkownika. Oprogramowanie, komunikujące się ze sterownikiem poprzez port szeregowy, powinno w sposób swobodny umożliwiać konfigurację parametrów, kontrolę nad urządzeniem oraz wyzwolenie procesu dozowania.
3. Przetestowanie systemu oraz przeprowadzenie procesu sprawdzania dokładności pomp dozujących (walidacja).

Rozdział 3

Projekt systemu automatycznego przygotowywania mieszanin

3.1. Konstrukcja systemu

Elementy zaprojektowanego oraz wykonanego systemu automatycznego przygotowywania mieszanin cieczy prezentuje schemat na Rys. 3.1. Podczas planowania podstawowej struktury zestawu, w głównej mierze kierowano się potrzebami, jakie powinien zaspokajać gotowy produkt. Brano również pod uwagę dostępność elementów składowych oraz nakład środków finansowych jakim dysponowano. Kluczowym dla projektu okazało się również przeprowadzone rozeznanie rynku komercyjnego pod względem budowy, możliwości oraz funkcji tychże systemów.

W skład zrealizowanego systemu wchodzi trzy podstawowe bloki:

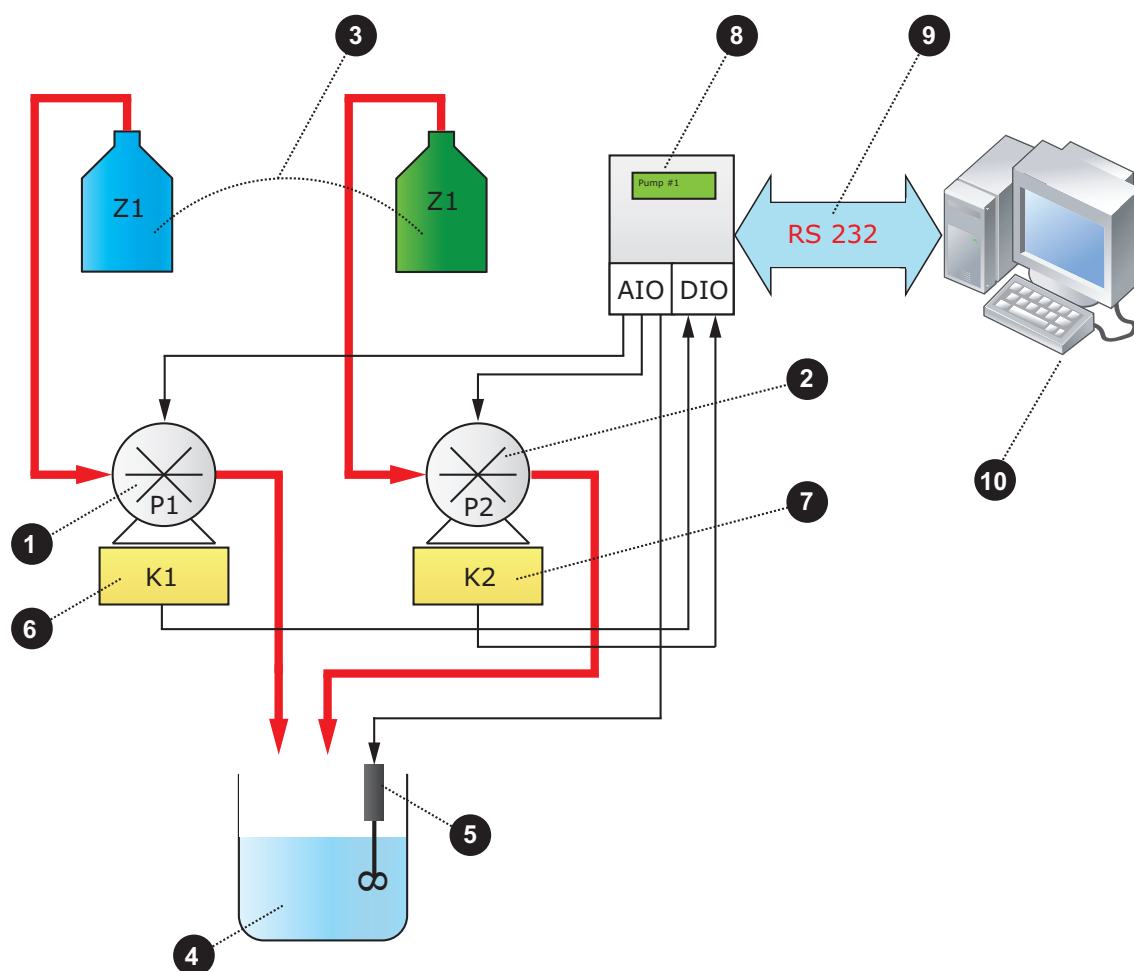
1. dozowniki wraz z czujnikami krańcowymi, mieszadło,
2. sterownik mikroprocesorowy,
3. komputer PC wraz z terminalem lub dedykowanym oprogramowaniem.

Z punktu widzenia automatyki każdy z elementów pełni następujące funkcje:

- dozowniki wraz z czujnikami, mieszadło – stanowią element wykonawczy z sygnałem sprzężenia zwrotnego,
- sterownik mikroprocesorowy – sterowanie bezpośrednie,
- komputer PC z oprogramowaniem – sterowanie nadrzędne, archiwizacja, wizualizacja.

3.2. Dozowniki

Jednym z ważniejszych elementów systemów przygotowywania mieszanin w automatyce laboratoryjnej jest układ transportu cieczy. Obejmuje on zestaw elastycznych przewodów doprowadzających oraz odprowadzających medium, zwykle wykonanych z tworzyw odpornych chemicznie, oraz dozowniki substancji [37].



RYSUNEK 3.1. Schemat ideowy systemu dozowania.

Elementy systemu: 1 – pompa P1 (A), 2 – pompa P2 (B), 3 – zasobniki z substancjami, 4 – zbiornik gotowej mieszaniny, 5 – mieszadło, 6 – czujnik krańcowy K1, 7 – czujnik krańcowy K2, 8 – sterownik mikroprocesorowy, 9 – kabel interfejsu RS-232, 10 – stacja robocza z oprogramowaniem

Mianem dozownika określa się zestaw podzespołów pozwalających na transport medium, np. cieczy, z zasobnika do wybranego obiektu, np. naczynia laboratoryjnego. Jak wspomniano w rozdziale 1, na rynku istnieje wiele rozmaitych rozwiązań, od bardzo prostych, obsługiwanych w sposób manualny, do zaawansowanych procesorów cieczowych, pracujących w sieciach magistralowych. Wraz z różnorodnością propozycji producentów, zróżnicowana jest również konstrukcja tychże dozowników. Jeśli rozpatrywać by w uproszczeniu urządzenia automatyczne, bazowymi komponentami wchodzącymi zwykle w ich skład są pompy lub wtryskiwacze oraz sekcja pomiaru/ograniczenia objętości wstrzykiwanej dawki.

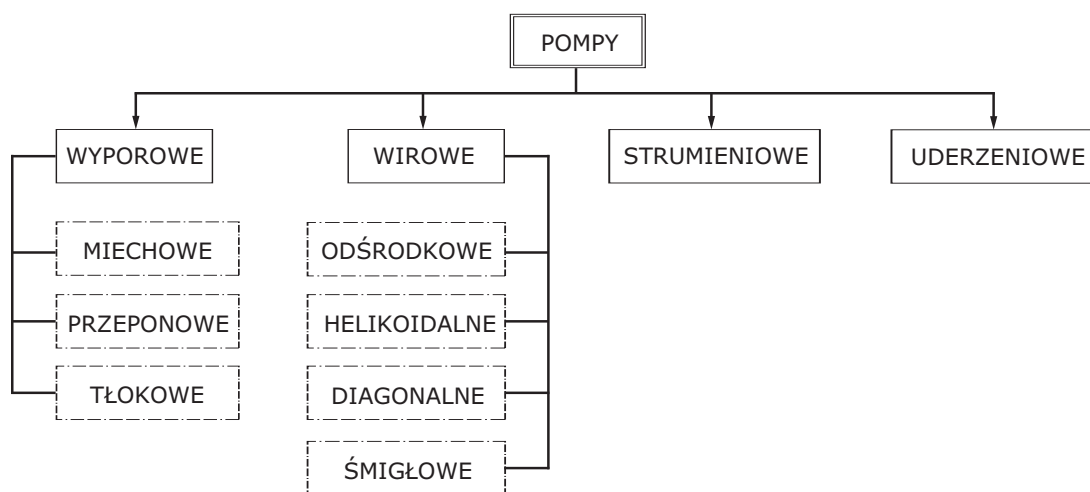
W początkowej fazie projektu, tj. planowaniu, jednym z ważniejszych zadań był dobór odpowiednich elementów systemu, w tym urządzeń dozujących. Na tym etapie istotnym jest aby ustalić szereg kryteriów, które ułatwią odpowiedni wybór. Kluczowym czynnikiem przy doborze pompy jest scharakteryzowanie konkretnej aplikacji, w jakiej zostanie ona uruchomiona [3, 38]. Podstawowymi wytycznymi jakimi kierowano się w poszukiwaniu i selekcji dozowników są:

- rodzaj pompy oraz charakterystyka pracy,
- odporność na substancje silnie reagujące,
- zakres kontroli wstrzykiwanych objętości,
- dokładność oraz powtarzalność dozowanej objętości dawki,
- możliwości włączenia dozownika w system tj. dopasowania realizowalnego sposobu sterowania,
- zasięg terytorialny przy zakupie,
- cena w ramach dostępnego budżetu.

Jak pokazała praktyka, nie łatwym zadaniem jest znalezienie odpowiedniego rodzaju dozownika, który spełniałby wszystkie założone kryteria. Przeważająca część rozważanych urządzeń była niezależnymi jednostkami, z wbudowanym interfejsem obsługi, bez możliwości pracy w systemie i kontroli przez zewnętrzny sterownik mikroprocesorowy. Proponowane były również bardzo rozbudowane rozwiązania, pracujące w sieci z dedykowanym oprogramowaniem, jednakże ich specyfikacja techniczna stanowiła własność intelektualną producenta, a ewentualna integracja w którekolwiek z nich równoważna była z utratą gwarancji. Po przeanalizowaniu dostępnych rozwiązań i ich możliwości pod względem aplikacji w powstałym systemie, zdecydowano się na użycie pomp odmierzających.

3.2.1. Pompy dozujące

Z definicji, pompa jest urządzeniem mechanicznym, które wytwarzając ciśnienie pomiędzy wlotem zasilającym (strona ssawna) oraz wylotem (strona tłoczna), służy do przenoszenia cieczy bądź też zawiesin w określonym systemie [18]. W zależności od konstrukcji pompy elementem wytwarzającym owe ciśnienie może być: tłok (w tym korbowód wraz z miechem), wirnik bądź membrana. Jedną z cech, względem której można przeprowadzić klasyfikację pomp, jest sposób wytwarzania różnicy ciśnień. Podstawowe typy tychże urządzeń przedstawia diagram z Rys. 3.2.

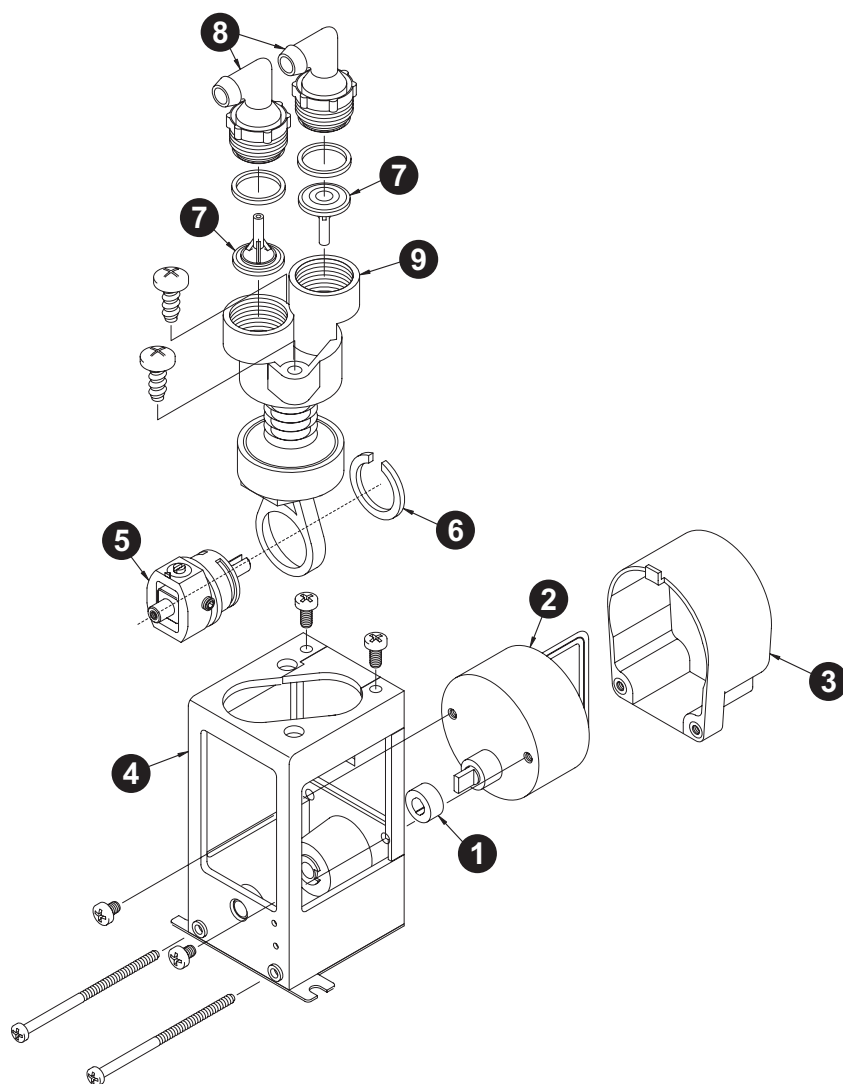


RYSUNEK 3.2. Podstawowy podział pomp

Rysunek wykonano na podstawie [18]

W projekcie systemu automatycznego przygotowywania mieszanin wykorzystano pompy miechowe z serii „*Mini Bellows Metering Pumps*” amerykańskiego potentata w produkcji pomp, firmy GORMAN-RUPP Industries. Zgodnie z omówionym podziałem, zaklasyfikować można ją do grupy pomp wyporowych. Pompy odmierzające działają zgodnie z ideą pompy wolumetrycznej, tj. istotnym założeniem jest, iż przepompowywana ciecz jest nieściśliwa. Zgodność z owym stwierdzeniem zapewnia poprawność oraz powtarzalność dozowanej dawki o określonej, deklarowanej przez producenta objętości [20].

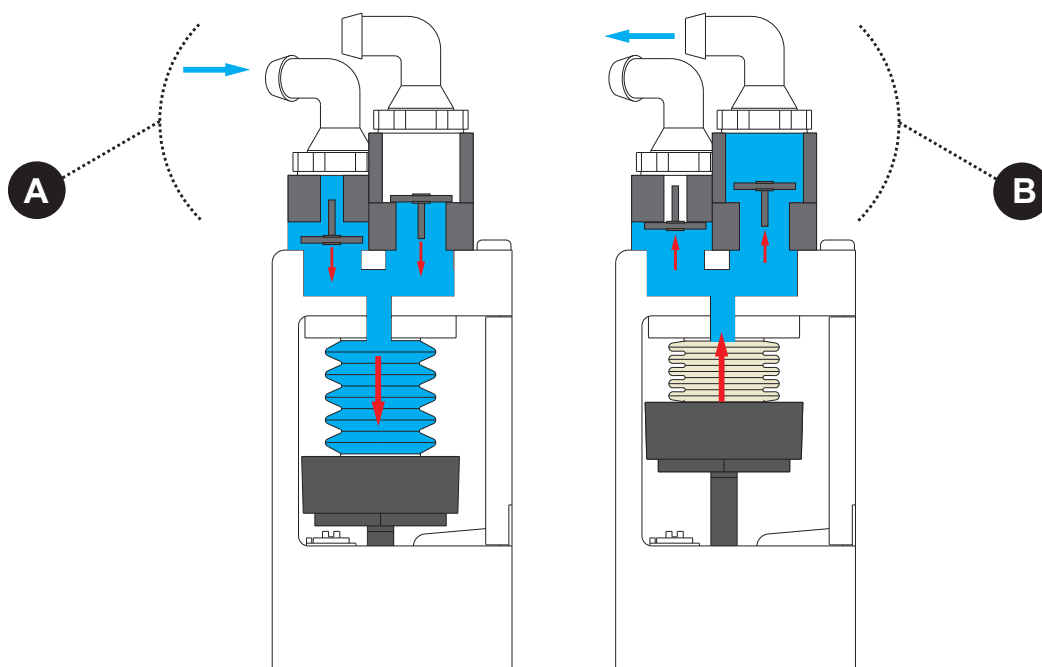
Aby w pełni zrozumieć zasadę działania miechowej pompy dozującej warto przyjrzeć się jej konstrukcji. Zestawienie najważniejszych elementów urządzenia zaprezentowano na Rys. 3.3. Poza napędem elektrycznym, opisanym w dalszej części rozdziału, istotnym dla poprawnej pracy jest organ roboczy, odpowiadający za wytworzenie odpowiedniego ciśnienia. Ruch organu roboczego pompy, tj. korbwodu, zdeterminowanego przez napędzający go wał, można określić jako posuwisto – zwrotny. Pojedynczy cykl dozowania odbywa się dwuetapowo. Pierwszy etap jest fazą ssania. Korbwód zostaje odchylony w dół, co powoduje powiększenie się przestrzeni miecha do maksymalnej jego wartości. Jak zdemostrowano na Rys. 3.4(A). wytworzone podciśnienie wewnątrz komory otwiera zawór ssawny, wypełniając tym samym przestrzeń substancją z wlotu doprowadzającego. Zawór tłoczny jest w tym czasie domknięty. Obrót wału powoduje przejście do kolejnego



RYSUNEK 3.3. Rysunek techniczny pompy

Lista ważniejszych elementów pompy: 1 – łącznik napędu, 2 – napęd (silnik prądu zmiennego), 3 – obudowa napędu, 4 – rama montażowa, 5 – wał korbowy, 6 – pierścień, 7 – konektory przewodów z medium (zasilający oraz wylotowy), 8 – zawory, 9 – moduł zawierający miszek, korbowód oraz głowicę pod zawory [13]

etapu – tłocznego. Odchylenie korbowodu w górę zmniejsza objętość miecha „ściskając” go. Następuje wytworzenie się nadciśnienia w komorze, co skutkuje otwarciem zaworu tłocznego oraz wypływem substancji do przewodu. Faza ta odbywa się przy domkniętym zaworze ssawnym i zilustrowana została na Rys. 3.4(B). Powtarzanie obydwu etapów naprzemiennie zapewnia dostarczanie odpowiedniej objętości substancji będącej krotnością dawki pojedynczego cyklu.



RYSUNEK 3.4. Fazy pojedynczego cyklu pompy

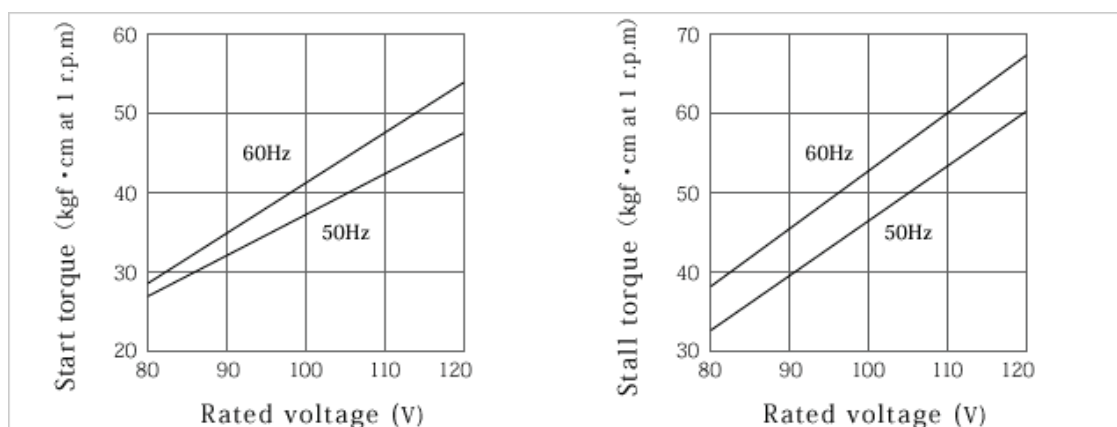
Podział cyklu na fazy: A – faza ssawna, B – faza tłoczna

Rolę napędu, poruszającego wał korbowy, pełni synchroniczny silnik prądu zmiennego model M8 firmy Misubishi Materials C.M.I. Urządzenia elektryczne tego typu charakteryzują się bardzo dobrą stabilnością obrotów. Taką właściwość zapewnia niezależność obrotów silnika od jego obciążenia. Obroty zależne są wyłącznie od częstotliwości napięcia zasilania [32]. Silnik zasilany może być prądem zmiennym o wartościach 110–120 V lub 200–240 V o częstotliwościach 50 oraz 60 Hz, co wywołuje obroty odpowiednio 750 lub 900 rpm. Na Rys 3.5 zaprezentowano charakterystyki momentów silnika w zależności od napięcia dla dwóch jego częstotliwości. Jak podaje producent [25], typowymi aplikacjami dla tego modelu silników są między innymi urządzenia wentylacji oraz klimatyzacji budynków, RTV/AGD, zawory regulacyjne oraz pompy dozujące.

Zestawienie podstawowych cech oraz parametrów techniczny pomp miechowych zaprezentowano w tabeli 3.1.

3.2.2. Sygnał sprzężenia zwrotnego

Zastosowane pompy miechowe realizując kolejne cykle, odmierzają dawki o określonej objętości, tj. jedna dawka (1,8 ml) na jeden cykl. Działanie takie ma charakter ciągły, a



RYSUNEK 3.5. Charakterystyka momentów silnika w zależności od napięcia zasilania

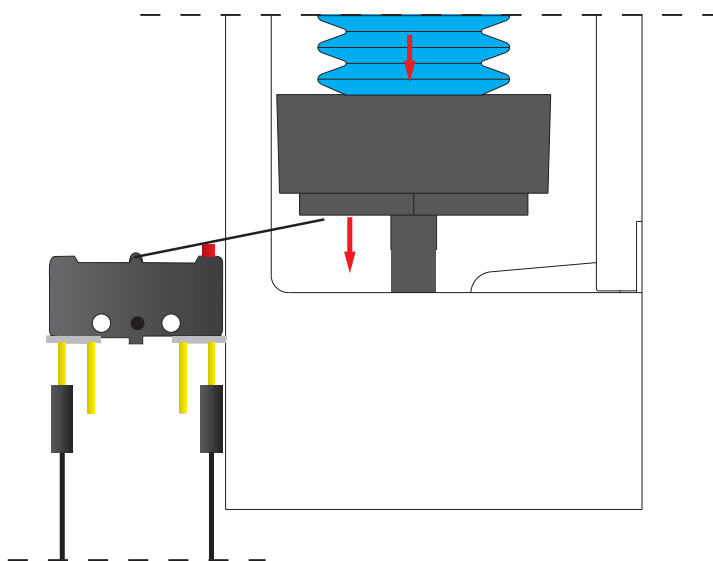
Na podstawie dokumentacji silnika [25]

proces dozowania trwa tak długo, jak do urządzenia doprowadzane jest zasilanie. Odłączenie pompy od źródła zasilania równoważne jest z jej zatrzymaniem, a tym samym zakończeniem procesu. Ze względu na taki typ pracy istnieje potrzeba kontroli działania pompy, aby możliwym było, zgodnie z założeniami projektu, otrzymanie zadanej objętości substancji.

TABLICA 3.1. Zestawienie najważniejszych cech oraz parametrów technicznych pomp miechowych

Rodzaj pompy	Pompa wyporowa, dozująca
Organ roboczy	Korbowód
Komora	Miech $\varnothing = 3/4''$
Objętość pojedynczej dawki	1,8 ml
Średnia powtarzalność	Objętość dawki $\pm 0,75\%$
Napęd	Synchroniczny silnik prądu zmiennego
Napięcie zasilania	100–240 V przy 50–60 Hz
Częstotliwość zasilania	50/60 Hz
Częstotliwość obrotów	8 rpm
Moc	3 W
Maksymalna wydajność	Dla 50 Hz – $12,0 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$, dla 60 Hz – $14,4 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$
Maksymalna temp. substancji	60°C (120°F)

Opracowano na podstawie [13]



RYSUNEK 3.6. Sposób mocowania czujnika krańcowego

Maksymalna częstotliwość obrotów z jaką pracuje pompa (8 rpm) jest stosunkowo małą wartością, skądinąd pożądaną w tego typu systemach przygotowywania mieszanin. Z tego punktu widzenia wpływ na szybkość działania dozownika okazał się mało istotną cechą. Przyjęto tym samym, iż wartość nominalna wydajności pomp jest w zupełności wystarczająca i nie ma potrzeby zmiany tych parametrów. Mimo to, do prawidłowego funkcjonowania dozownika oraz kontroli nad nim, potrzebna jest informacja o liczbie cykli wykonanych przez urządzenie. W tym celu posłużono się dodatkowym elementem dołączonym do zestawu pomp. Do zliczania kolejnych dozowań (wstrzyknień) oraz generowania sygnału sprzężenia zwrotnego w systemie posłużyły czujniki krańcowe firmy Promet, model 83–133. Sposób ich mocowania przedstawiony został na Rys. 3.6. Widoczne na rysunku przewody łączą czujnik z zaciskami sterownika mikroprocesorowego. Podczas fazy ssawnej, gdy poruszający się w kierunku wału korbowód najedzie na metalowe ramie czujnika, następuje złączenie styków wewnętrznych oraz zwarcie obwodu. Fakt ten zostaje zarejestrowany przez omówiony w kolejnym rozdziale sterownik jako inkrementacja liczby dozowań. Jeśli liczba wstrzyknień równa jest wartości zadanej, zasilanie pompy zostaje odłączone, a praca pompy zatrzymana. Zastosowany w czujnikach mikroprzełącznik charakteryzuje się następującymi parametrami: znamionowe napięcie zmienne 230 V przy 50 – 60 Hz, znamionowy prąd 6 A, trwałość do $85 \cdot 10^3$ [36].

3.3. Mieszadło

Głównym zadaniem mieszadła jest zapewnienie jednorodności zaprojektowanej substancji. Proces mieszania w znacznym stopniu przyspiesza osiągnięcie takiego stanu. Istnieje wiele sposobów realizacji tego zadania, w tym najbardziej popularne to: mieszanie mechaniczne, mieszanie strumieniem cieczy bądź gazu (tzw. barbotaż), przepływ składników przez pompę (mieszanie w pompie) [39].

W projekcie wykorzystano pierwszy ze sposobów mieszania – mieszadło mechaniczne. Wir generowany przez obroty mieszadła łopatkowego powoduje ruchy masy obydwu substancji składowych w skali mikro. Proces ten prowadzi o ujednorodnienia mieszaniny. Rozwiązaniem układowym powstałego systemu jest, specjalnie zaadoptowane mieszadło łopatkowe. Pierwotnie wchodziło ono w skład laboratoryjnego urządzenia miareczkującego firmy Orion (obecnie Thermo scientific) model 950. Kontrolę nad mieszadłem oraz źródło zasilania +5 V zapewnia sterownik systemu.

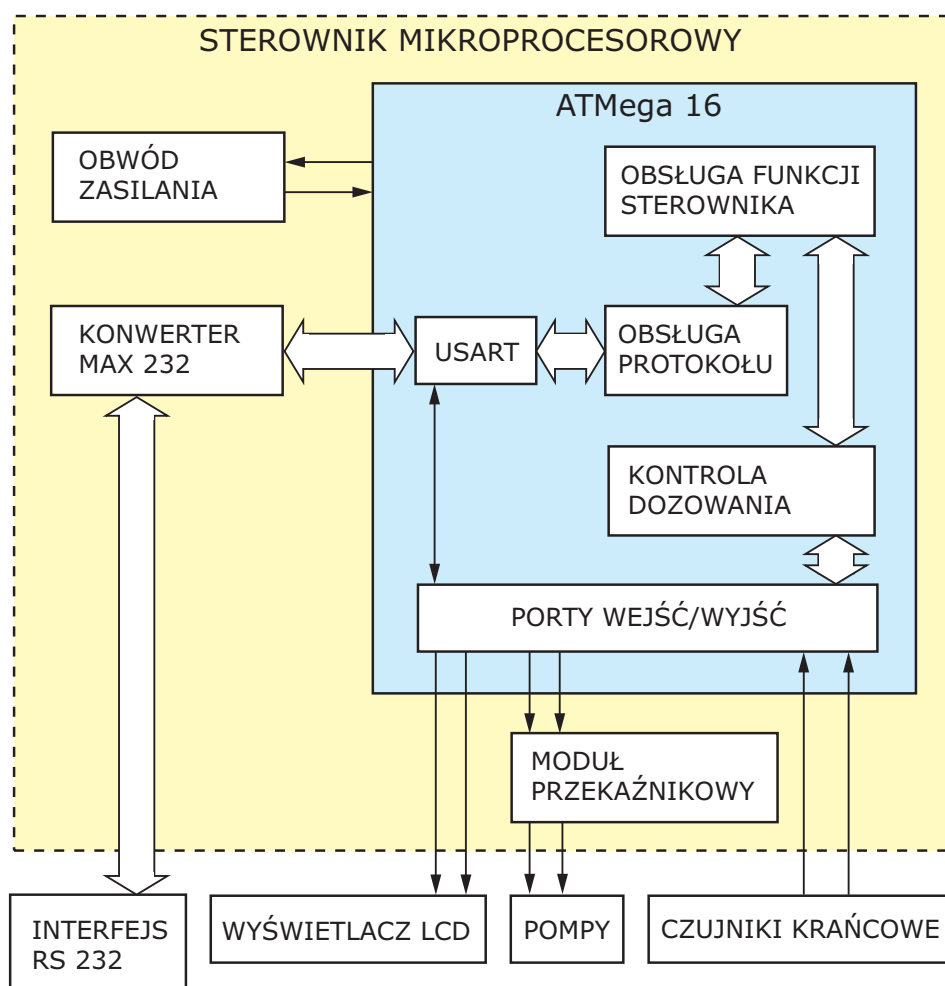
3.4. Sterownik mikroprocesorowy

W obecnych czasach urządzenia mikroprocesorowe są nieodłącznym elementem wszelkiego rodzaju systemów sterowania. Również w przypadku zautomatyzowanych instalacji, w badaniach eksperymentalnych oraz chemii stanowią podstawowy blok integrujący elementy wykonawcze z logiką działania. Odpowiednie sterowanie wypracowywane jest na podstawie otrzymywanych sygnałów wejściowych, pochodzących z czujników bądź od operatora.

Dla potrzeb kontroli nad powstałym systemem automatycznego przygotowywania mieszanin zaprojektowane zostało urządzenie elektroniczne o charakterze sterownika. Na Rys. 3.7 zaprezentowany został schemat blokowy najważniejszych elementów wchodzących w skład systemu mikroprocesorowego.

3.4.1. Zasilanie

Istotnym elementem wchodzących w skład tzw. obwodu podstawowego urządzeń elektronicznych jest zasilacz. Jego zadaniem jest dostarczenie potrzebnej do pracy energii

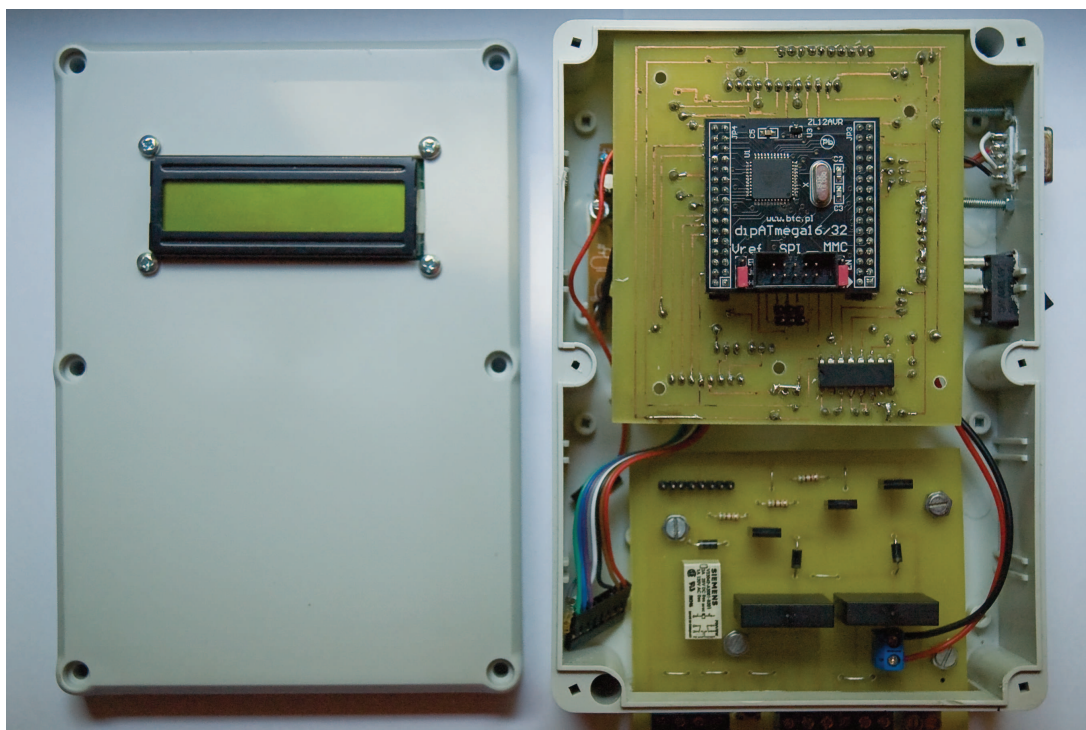


RYSUNEK 3.7. Schemat blokowy sterownika

elektrycznej. W tym przypadku jest to źródło napięcia stałego o wartości 5 V, będące standardem w zasilaniu scalonych układów cyfrowych. Wykorzystany zasilacz zakupiony został w postaci modułu, z możliwością dowolnego montażu w urządzeniach. Parametry modułu zasilacza zamieszczone zostały w Tab. 3.2

TABLICA 3.2. Parametry zasilacza.

Prąd zasilania	Prąd zmienny (AC)
Napięcie zasilania	100 – 240 V
Częstotliwość	50 – 60 Hz
Moc	3 W
Prąd wyjściowy	Prąd stały (DC) 600 mA
Napięcie wyjściowe	5,2 V



RYSUNEK 3.8. Fotografia wykonanego sterownika. Widok przed ostatecznym montażem.

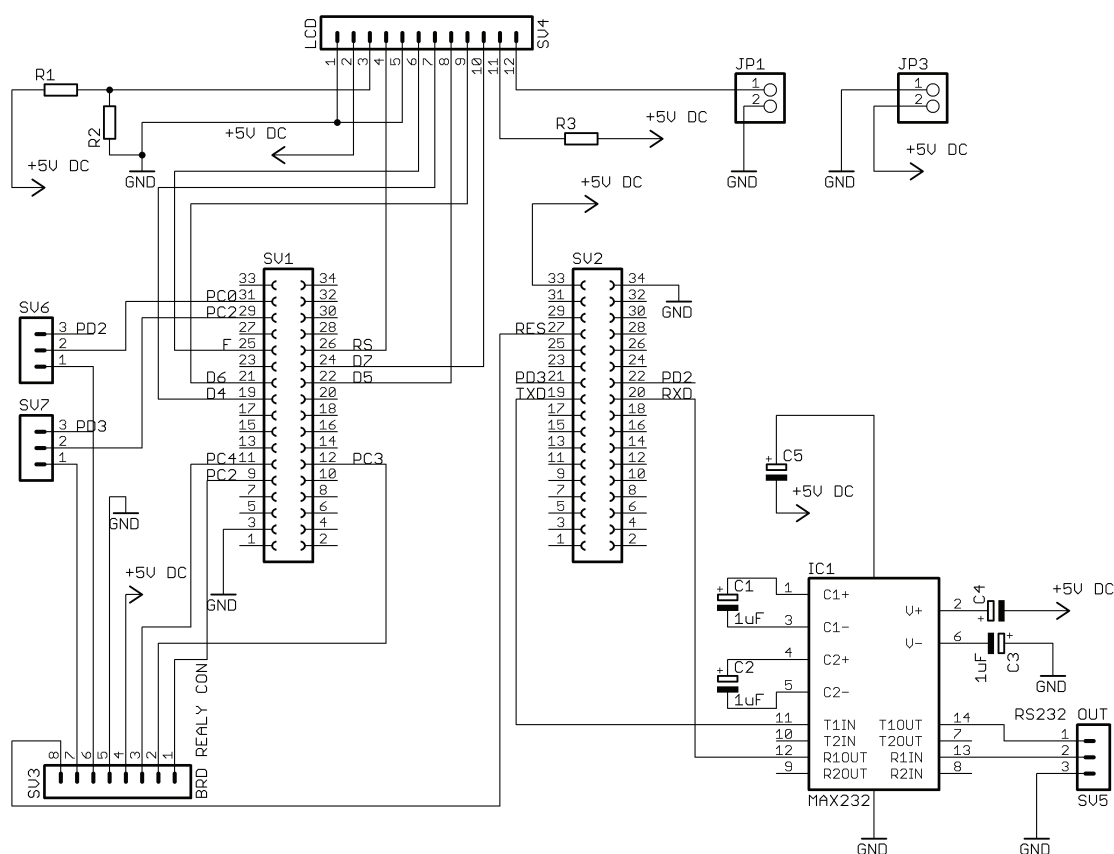
3.4.2. Płyta główna

Elementy elektroniczne sterownika zamontowane zostały na specjalnie wykonanych w tym celu płytach PCB¹. W procesie projektowania obwodów drukowanych posłużono się darmową wersją komercyjnego oprogramowania CAD² – EAGLE firmy CadSoft. Jest on jednym z najpopularniejszych pakietów wspomagających projektowanie urządzeń i układów elektronicznych. Składa się z trzech podstawowych programów: edytora schematów (Schematic Editor), edytora bibliotek elementów (Library Editor) oraz edytora płytki drukowanej (Layout Editor).

Płyte główną sterownika wykonano samodzielnie metodą termotransferu druku laserowego na laminat pokryty miedzią. Proces trawienia przeprowadzono środkiem nadsiarczanu sodu B327 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$. Rezultat przedstawia Rys. 3.8.

¹ PCB (ang. Printed Circuit Board) – płyta obwodów drukowanych

² CAD (ang. Computer Aided Design) – oprogramowanie wspomagające proces projektowania



RYSUNEK 3.9. Schemat elektryczny płyty głównej

3.4.3. Zasilanie

Zawiera ona między innymi gniazdo pod moduł z mikrokontrolerem, tor komunikacji szeregowej oraz wyprowadzenia linii wejść/wyjść dla sygnałów sterujących i peryferiów jak wyświetlacz LCD. Na Rys. 3.9 przedstawiono schemat elektryczny płyty głównej sterownika.

3.4.3.1. Mikrokontroler. Głównym elementem logicznym sterownika mikroprocesorowego jest należący do popularnej rodziny 8-bitowych układów AVR mikrokontroler AT-Mega16 firmy Atmel. Przy doborze mikrokontrolera kierowano się między innymi kryteriami takimi jak możliwości realizacji programu sterowania, liczba linii wejść/wyjść dwustanowych, wyposażenie – w tym interfejsy komunikacyjne, liczniki/timery, wielkość pamięci programu. Istotna była również dostępność układu oraz stosunkowo niski koszt, w przypadku konieczności wymiany, ze względu na ewentualne uszkodzenie.

Rodzina 8-bitowych mikrokontrolerów AVR składa się z trzech podrodzin: AVR Tiny, AVR oraz Mega AVR. Wykorzystany układ należy do najlepiej wyposażonej grupy tj. Mega AVR. Cechuje je bardzo pojemna pamięć programu (FLASH) i danych (EEPROM) oraz rozbudowana sieć dostępnych peryferiów. Budowa ATMega16 oparta jest na architekturze harwardzkiej o zredukowanej liczbie instrukcji (RISC), na rzecz rozbudowanej struktury rejestrów. W przeciwieństwie do architektury CISC, większość rozkazów realizowana jest w pojedynczym takcie zegara, co pomimo zmniejszonej ich ilości gwarantuje dużą spójność kodu wynikowego. Duża dostępność, niewielki koszt układów oraz niezwykle wygodna i wydajna możliwość pisania kodu w języku wysokiego poziomu C sprawiają, iż mikrokontrolery z rodziny AVR są jednymi z najpopularniejszych i najchętniej używanych na rynku [14].

Poniżej przedstawiono zestawienie najważniejszych cech oraz parametrów układu AT-Mega16 firmy Atmel:

- Niskonapięciowy 8-bitowy mikrokontroler z rodziny AVR
- Zasilany napięciem stałym z zakresu 4.5 – 5.5 V
- Zaawansowana architektura o zredukowanej liczbie rozkazów (RISC)
 - 131 instrukcji we większości wykonywanych w jednym takcie zegara
 - 32 x 8 Rejestrów ogólnego przeznaczenia
 - Wydajność do 16 MIPS przy 16 MHz
- Wysokiej wytrzymałości, nieulotna pamięć
 - 16 kB pamięci programu FLASH
 - 512 B pamięci danych EEPROM
 - 1 kB pamięci wewnętrznej SRAM
- Interfejs JTAG zgodny z IEEE 1149.1
- Peryferia
 - Dwa 8bit czasomierze/liczniki (timer/counter)
 - Jeden 16bit czasomierz/licznik (timer/counter)
 - Generator PWM
 - 8 kanałowy 10-bitowy przetwornik A/C i C/A
 - Programowalny interfejs komunikacji szeregowej USART
 - Interfejs SPI
- 32 dowolnie programowalne linie wejść/wyjść
- Dostępny w obudowach PDIP, TQFP oraz QFN

Wykorzystany w projekcie mikrokontroler zakupiony został w formie modułu z umocowanym powierzchniowo układem w obudowie TQFP. Wszystkie linie mikrokontrolera zostały wyprowadzone i dostępne są w postaci goldpinów. Moduł, poza samym układem scalonym posiada rezonator kwarcowy o częstotliwości 16 MHz, generator sygnału zerującego DS1813, 10-pinowe złącze interfejsu ISP oraz zworki konfiguracyjne do wyboru źródła napięcia referencyjnego dla przetwornika C/A i A/C.

3.4.4. Moduł wejść / wyjść sterownika

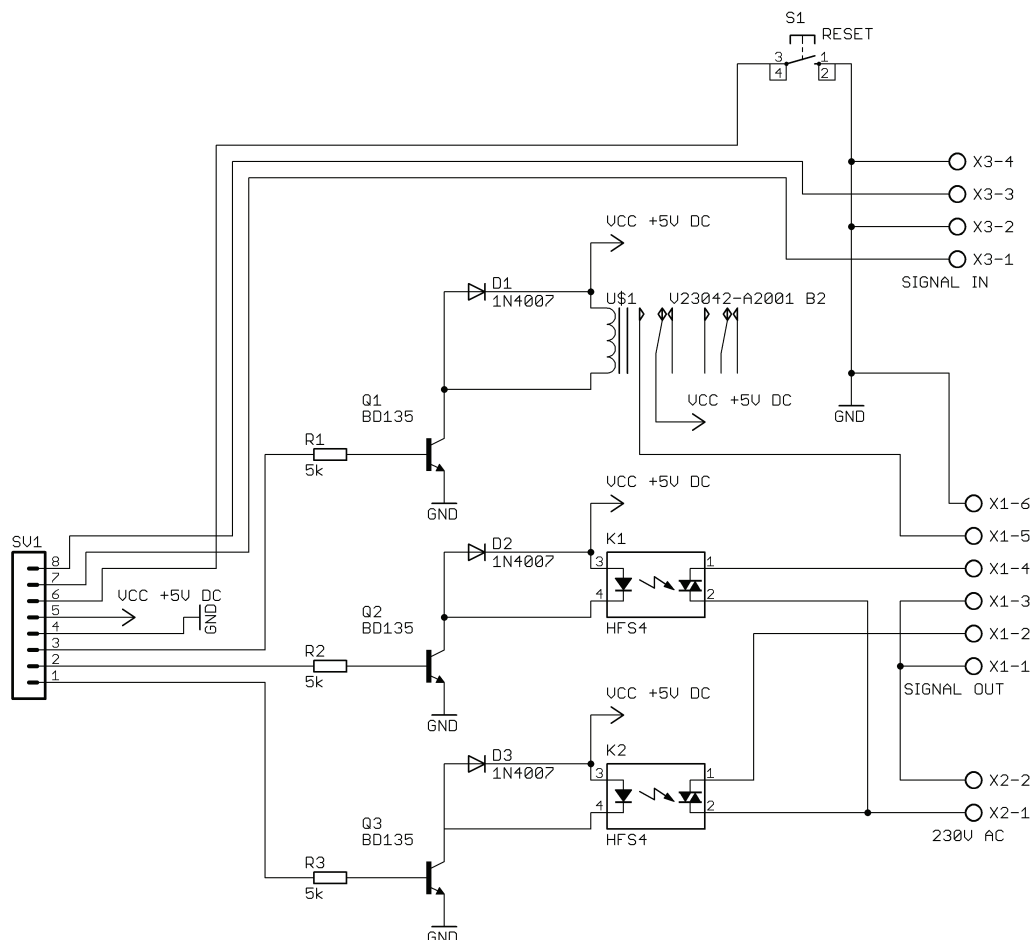
W procesie projektowania sterownika systemu zdecydowano się na separację bloku sterowania i komunikacji oraz bloku wejść / wyjść. Przyjęte rozwiązanie ma na celu ułatwienie ewentualnej rekonfiguracji sprzętowej systemu. Dodanie nowych elementów, takich jak dozowniki czy miesadła, pociąga za sobą konieczność zwielokrotnienia obwodów zasilania oraz przełączających, lecz nie wymaga dokonywania zmian w jednostce sterującej (płyta główna z mikrokontrolerem).

Płyta PCB pod moduł wejść/wyjść sterownika wykonana została przy pomocy tych samych narzędzi oraz technologii co płyta główna. Strukturę modułu, względem kryterium pełnionych funkcji, można podzielić na następujące sekcje:

1. Sekcja generowania sygnału sterującego
2. Sekcja akwizycji sygnału

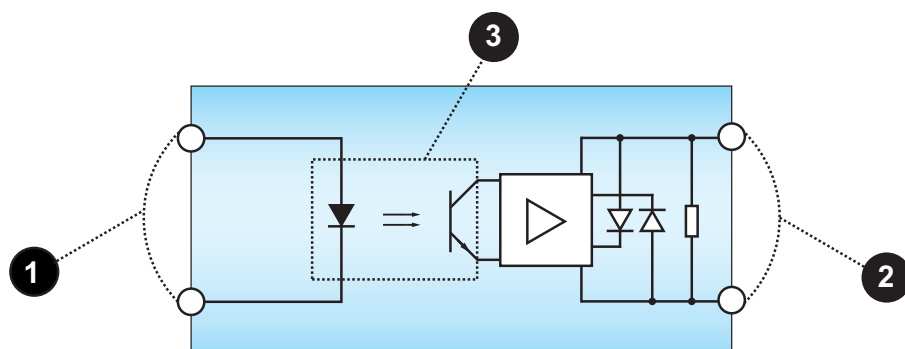
Pierwsza z nich odpowiada za uruchomienie wchodzących w skład systemu elementów wykonawczych – pomp oraz miesadła. Na zaprezentowanym schemacie elektrycznym (Rys. 3.10) wyprowadzone sygnały z wyjść mikrokontrolera kierowane są na tranzystory bipolarne NPN, pracujące w układzie kluczy analogowych. Zastosowana separacja powoduje, iż widoczne w dalszej części przekaźniki wysterowywane są z wykorzystaniem napięcia +5 V nie obciążając tym samym portu procesora. Na potrzebę realizacji sterowania dwustanowego (włącz/wyłącz) wykorzystano dwa typy przekaźników. Zasilanie pomp miechowych przełączane jest za pomocą przekaźników półprzewodnikowych firmy Hongfa Relay. Na Rys. 3.11 zaprezentowano budowę typowego przekaźnika SSR³. Brak elementów mechanicznych, na rzecz sprzężenia optycznego sprawia, iż cechują się one bardzo wysoką niezawodnością, dużą częstotliwością operacji łączeniowych, brakiem zakłóceń elektromagnetycznych oraz wysoką odpornością na środowisko agresywne, chemikalia i

³ SSR (ang. Solid State Relay) – przekaźnik półprzewodnikowy



RYSUNEK 3.10. Schemat elektryczny modułu wejść / wyjść

kurz. Mieszadło natomiast, zasilane napięciem stałym +5 V, uruchamiane jest za pomocą konwencjonalnego przekaźnika elektromagnetycznego. Cewka przekaźnika w stanie zadziałania posiada bardzo dużą indukcyjność, wyłączenie jej powoduje raptowny wzrost napięcia na zaciskach [27]. Uderzenie takie może spowodować uszkodzenie przełączający zasilanie przekaźnika tranzystor. Zakłócenie impulsowe towarzyszące temu zjawisku w negatywny sposób wpływa na funkcjonowanie układów elektronicznych, w tym mikrokontrolera. Zatem powszechną praktyką, w przypadku zasilania napięciem stałym, jest umieszczanie w torze zasilania cewki diody prostowniczej, pełniącej funkcję zabezpieczenia. Tabela 3.3 zawiera podstawowe dane techniczne wykorzystanych w projekcie przekaźników [2]. Sekcja akwizycji odpowiada za doprowadzenie sygnału sprzężenia zwrotnego z czujników krańcowych do odpowiednich wejść mikrokontrolera. Poza wspomnianymi sekcjami moduł zawiera szereg listew zaciskowych typu ARK do podłączenia elementów systemu.



RYSUNEK 3.11. Budowa przełącznika półprzewodnikowego

Elementy schematu: 1 – wejście sterujące, 2 – wyjście mocy, 3 – sprzężenie optyczne. Na podstawie dokumentacji [28]

3.4.5. Komunikacja z komputerem PC

Najniższa warstwa sterowania realizowana jest w pełni poprzez sterownik mikroprocesorowy. Obsługa systemu, zgodnie z założeniami projektu, odbywa się z poziomu komputera PC (warstwa sterowania nadrzędnego). Aby zrealizować taki schemat interakcji koniecznym było uruchomienie komunikacji na drodze komputer – sterownik.

Jednym z najpowszechniej wykorzystywanych sposobów komunikacji urządzeń elektronicznych jest transmisja szeregową bit po bicie. Jest stosunkowo łatwa w realizacji sprzętowej oraz implementacji programowej. Wymiana danych pomiędzy dwoma urządzeniami odbywać się może na trzy sposoby (w trzech kierunkach) [26]:

1. Simplex – transmisja jednokierunkowa.

TABLICA 3.3. Podstawowe parametry przełączników.

Cecha	Przełącznik	
Producent	Siemens	Hongfa Relay
Model	D2 B23042 - A2001	HFS4
Typ	elektromagnetyczny	półprzewodnikowy SSR
Napięcie zasilania cewki	4 – 12.3 VDC	4 – 6 VDC
Napięcie zestyków (przełączane)	150 VDC, 250 VAC	75 – 264 VAC
Maksymalna wartość obciążenia	5 A	2 A
Typowy czas reakcji	4 ms	1 ms
Liczba cykli łączeniowych	Do 10^7 cykli	Powyżej 10^9 cykli

Opracowano na podstawie [16, 35]

2. Half - duplex – transmisja odbywa się w obydwu kierunkach, lecz w jednym przedziale czasu nadawać może tylko jedno urządzenie.
3. Full - duplex – wymiana danych odbywa się w przeciwnych kierunkach symultanicznie.

We wszelkiego rodzaju mikrokontrolerach elementem obsługującym komunikację szeregową jest układ UART⁴. Ze względu na fakt, iż wykorzystany układ ATMega16 również posiada blok USART (UART) zdecydowano się uruchomić właśnie ten typ transmisji. Przesyłanie danych pomiędzy urządzeniami odbywa się za pomocą najpopularniejszego interfejsu komunikacji szeregowej – RS-232 (zgodny z polską normą PN-75/T-05052). Ponieważ układy transmisji szeregowej, wbudowane w mikrokontrolery, realizują komunikację w standardzie poziomów napięciowych TTL⁵ w logice dodatniej, tj. logiczne „0” dla stanu niskiego, gdy potencjał ma wartość 0–0,8 V, logiczna „1” dla napięcia 2–5 V, koniecznym jest zapewnienie konwersji stanów do standardu RS-232. W tym celu zastosowano dedykowany układ MAX232 firmy MAXIM. Pojawiająca się logiczna „1” na wejściu układu przetworzona zostaje na napięcie stałe o wartości -12 V , logiczne „0” natomiast na sygnał o wartości $+12\text{ V}$.

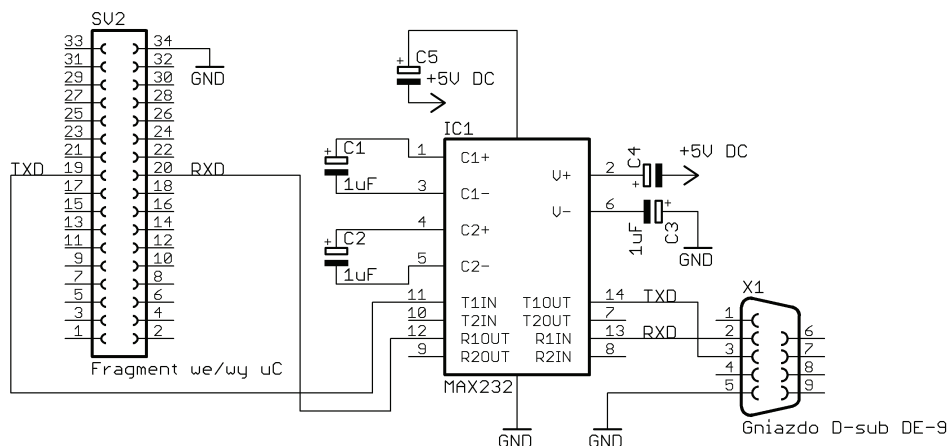
Wykonaną sekcję komunikacji szeregowej przedstawia schemat elektryczny na Rys. 3.12. Widoczne na schemacie trzy linie tj. TxD (dane wysyłane), RxD (dane nadawane), GND (masa sygnałowa) z dziewięciu dostępnych w standardzie w pełni zaspokajają potrzeby komunikacji asynchronicznej. Obydwa urządzenia połączone są w konfiguracji null-modem, a co za tym idzie koniecznym jest odpowiednio przystosowany przewód komunikacyjny. Schemat przewodu ze „skrzyżowanymi” liniami danych prezentuje Rys. 3.13.

3.4.6. Oprogramowanie mikrokontrolera

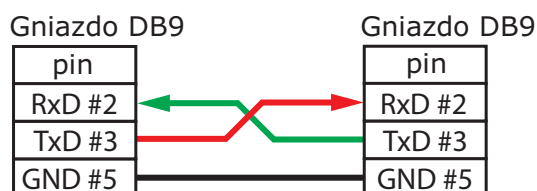
Zaprojektowany oraz wykonany sterownik systemu dozowania wyposażony jest w moduł z mikrokontrolerem ATMega16. Oprogramowanie dla tego typu układów może być napisane aż w trzech różnych językach programowania, w tym: assembler, C oraz BASIC. Dla potrzeb implementacji oprogramowania sterującego wybrano C. Język ten, w przeciwieństwie do assemblera, jest językiem wysokiego poziomu, w związku z czym krótki czas pisania kodu, oraz jego organizacja i dobra czytelność są niepodważającymi

⁴ UART (ang. Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) - układ asynchronicznej transmisji szeregowej

⁵ TTL (ang. Transistor-transistor logic) - klasa układów scalonych zapoczątkowana przez Texas Instruments w roku 1961



RYSUNEK 3.12. Schemat elektryczny toru komunikacji szeregowej



RYSUNEK 3.13. Schemat przewodu komunikacyjnego typu null-modem w standardzie RS232

Na podstawie dokumentacji [26]

atutami przy realizacji większych projektów. Pomimo że C to język wysokiego poziomu, możliwy jest dostęp do urządzeń oraz stabilna komunikacja i kontrola nad peryferiami w systemie mikroprocesorowym [11]. Częstym problemem, z jakim borykają się programiści systemów wbudowanych, jest zbyt obszerna objętość kodu wynikowego przy jednocześnie ograniczonej pamięci programu mikrokontrolera. Pod tym względem uzyskany kod maszynowy w języku C na ogół jest bardziej optymalny od tego napisanego w BASCOM.

Jednym z ważniejszych narzędzi przy uruchamianiu oprogramowania jest kompilator języka. W trakcie realizacji projektu korzystano z darmowego pakietu WinAVR, w którego skład wchodzi między innymi kompilator języka C AVR-GCC, debugger AVR-GDB oraz zestaw niezwykle użytecznych bibliotek dedykowanych rodzinie mikrokontrolerów AVR. Jako oprogramowanie typu open source dostępne jest dla wielu platform systemowych. Cały czas również trwają prace nad jego rozwojem, co owocuje okresowymi aktualizacjami wzbogaconymi o nowe funkcje. Rolę edytora kodu pełniło środowisko IDE⁶ – AVR

⁶ IDE (ang. Integrated Development Environment) - jest aplikacją bądź ich zespołem, służącym do tworzenia, modyfikowania oraz testowania oprogramowania

Studio 4, dostarczone przez producenta układów – firmę Atmel. Najważniejszymi zaleceniami tego nieodpłatnego oprogramowania jest, pełna integracja z pakietem WinAVR, w tym kompilatorem i debbuggerem oraz wbudowany symulator układów scalonych.

3.4.6.1. Organizacja oraz funkcjonowanie oprogramowania sterownika. W celu uporządkowania całości napisanego kodu podzielono go tematycznie na osobne pliki źródłowe o rozszerzeniu *.c wraz z ich plikami nagłówkowymi *.h. Poniżej przedstawiono listę plików wchodzących w skład projektu:

- *main.c* oraz *main.h* – wraz z funkcją `main()` oraz główną pętlą stanowi podstawowy plik oprogramowania. W jego części nagłówkowej dołączone są również biblioteki standardowe języka C oraz biblioteki pakietu WinAVR. Integruje ze sobą pozostałe fragmenty kodu.
- *ini.c* oraz *ini.h* – zawiera listę funkcji odpowiedzialnych za inicjalizację poszczególnych elementów oprogramowania oraz parametry obsługi peryferiów.
- *lcd.c* oraz *lcd.h* – lista funkcji obsługi wyświetlacza LCD dołączonego do sterownika. W tym między innymi wyświetlanie pojedynczych znaków oraz ciągów, zmiana pozycji kursora.
- *usart.c* oraz *usart.h* – zawiera funkcje obsługi interfejsu komunikacji szeregowej (USART). Główne zadania to odbiór pojedynczych znaków po pojawieniu się zgłoszenia obsługi interfejsu oraz ich wysyłanie do komputera PC.
- *prot.c* oraz *prot.h* – implementacji funkcji obsługi protokołu, kluczowych dla utrzymania poprawnej komunikacji z urządzeniem.

Jedną z kluczowych funkcji sterownika, a co za tym idzie i jego oprogramowania, jest bezpośrednia kontrola nad urządzeniami dozującymi oraz innymi peryferiami. Istotnym dla procesu sterowania jest możliwość konfiguracji jego sposobu oraz parametryzacji urządzeń wykonawczych. Jako że pracujące w systemie pompy dozujące, nie są urządzeniami zmikroprocesorowanymi, a sterowanie nimi odbywa się na zasadzie włącz/wyłącz, funkcję tę przejmuje kontroler. Istnieje wiele sposobów organizacji struktury konfiguracyjnej, jedną z bardziej popularnych, wykorzystywanych również w przemysłowych sterownikach

PLC⁷, jest struktura rejestrów. Na potrzebę realizacji projektu odwzorowano obiekty świata rzeczywistego (dozowniki, mieszadło) na abstrakcję oprogramowani w języku C. Tab. 3.4 zawiera charakterystykę rejestrów konfiguracyjnych poszczególnych urządzeń.

Po uruchomieniu sterownika, tj. doprowadzeniu zasilania do mikrokontrolera, układ rozpoczyna wykonywanie programu, w tym głównej jego funkcji *main()*. W pierwszej kolejności następuje inicjalizacja parametrów urządzeń peryferyjnych (wejść/ wyjść), komunikacji, rejestrów konfiguracyjnych. Służą temu procedury zawarte w pliku źródłowym *ini.c*, należą do nich:

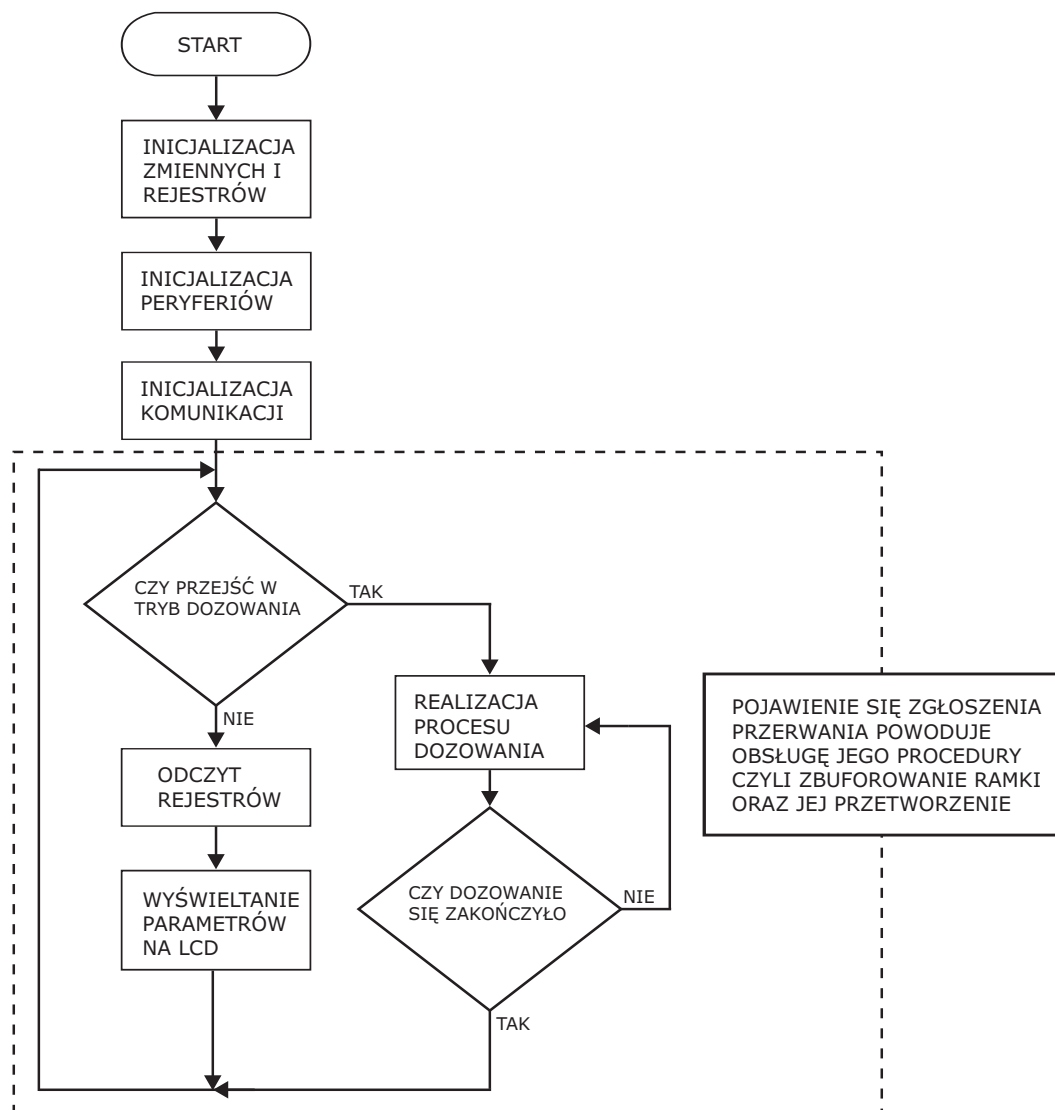
```
INIT_io(); // IO initialization
INIT_lcd(); // LCD initialization
INIT_reg(); // Registers initialization
INIT_usart(); // USART initialization
INIT_prot(); // Protocol initialization
```

Jak zademonstrowano na diagramie z Rys. 3.14, w kolejnym kroku, po dokonaniu stosownej inicjalizacji, program mikrokontrolera przechodzi w główną pętlę. Uruchomiony zostaje tym samym jeden z dwóch trybów pracy sterownika. Pierwszy z nich to tryb skanowania, który uruchamiany jest zaraz po włączeniu urządzenia. Polega on w głównej

TABLICA 3.4. Struktura rejestrów urządzeń

Indeks	Przyjmowana wartość	Objaśnienie
Sterownik		
0	0 - wyłączony, 1 - włączony	Stan sterownika
2	0 - tryb skanowanie 1 - tryb dozowania	Tryb działania
Dozowniki		
0	0 - niepodłączona, 1 - podłączona	Pompa podłączona do sterownika
1	0 - brak, 1 - skanowane	Tryb skanowania parametrów
2	0 - nie, 1 - tak	Bierze udział w dozowaniu
3	max. 0xFFFFh	Wartość zadana dozowania
4	max. 0xFFFFh	Aktualna wartość w procesie
Mieszadło		
0	0 - wyłączone, 1 - włączone	Stan pracy mieszadła

⁷ PLC (ang. Programmable Logic Controller) - swobodnie programowalne urządzenie, służące do sterowania pracą maszyn lub urządzeń technologicznych.



RYSUNEK 3.14. Diagram głównej pętli programu

mierze na odczycie w pętli wartości rejestrów urządzeń oraz przenoszeniu wybranych parametrów na wyświetlacz LCD. Dzięki temu użytkownik systemu ma cały czas wgląd w ważniejsze parametry. W trybie tym istnieje również możliwość dokonywania oraz zmiany konfiguracji procesu dozowania, co ma ścisły związek z komunikacją, jednakże zagadnienie to zostanie poruszone w dalszej części pracy. W pętli skanowania sprawdzana jest również jedna z flag rejestru sterownika `CONTR_reg[0]`. Odpowiada ona za zmianę trybu pracy urządzenia. Zapis wartości w postaci `0x1h` skutkuje przejściem do trybu dozowania uruchamiającego proces przygotowywania mieszanin. Poniżej zaprezentowano fragment kodu głównej pętli.

```
while(1) // Main loop
```

```

{
    if( CONTR_reg[0] == 1 ) // Start dosing (DOSING MODE)
    {
        // Dosing mode handle functions
        CONTR_reg[0] == 0;
    }
    else // Start scan registers (SCAN MODE)
    {
        // Scan mode handle functions
    }
}

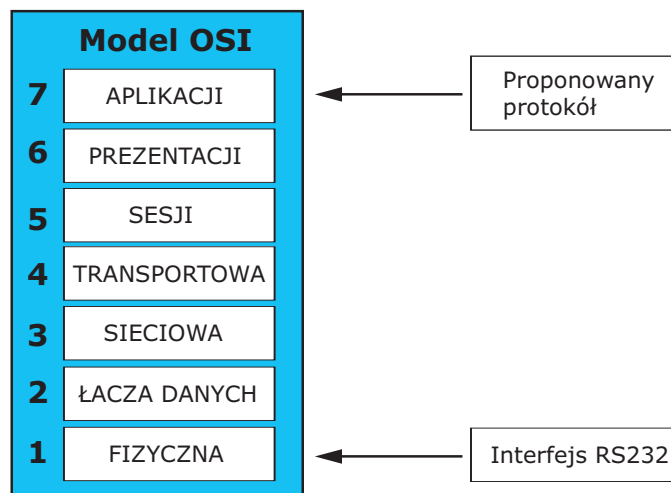
```

3.4.6.2. Implementacja obsługi komunikacji. Istotnym aspektem funkcjonowania sterownika oraz przeprowadzania procesu dozowania jest komunikacja z komputerem PC. Duże znaczenie właśnie tego zagadnienia programowo – sprzętowego bierze się z faktu, iż za jego pośrednictwem realizowane są następujące czynności:

- parametryzacja urządzeń wykonawczych (dozowników, mieszadła),
- parametryzacja procesu dozowania,
- obsługa procesu dozowania, jego wyzwolenie oraz zatrzymanie,
- podgląd parametrów konfiguracyjnych,
- podgląd aktualnych wartości procesu w trakcie jego realizacji.

Realizowana przez sterownik obsługa komunikacji odbywa się dwupoziomowo. W odniesieniu do zaprezentowanego na Rys. 3.15 referencyjnego modelu OSI⁸ obejmuje ona dwie warstwy. Warstwę pierwszą – fizyczną, która odpowiada za przesyłanie danych bit po bicie oraz warstwę siódmą – aplikacji, charakteryzującą transmisję danych w określonych ramach w oparciu o zaproponowany protokół. Bazą dla warstwy fizycznej jest interfejs RS-232 wraz ze specyfikacją aspektów mechanicznych oraz elektrycznych zawartych w standardzie. Do inicjalizacji połączenia z wykorzystaniem wspomnianego interfejsu, służy funkcja `USART_init()` dostępna w pliku `usart.c`. Za jej pomocą możliwy jest zapis,

⁸ OSI (ang. Open System Interconnection) - siedmiowarstwowy referencyjny model komunikacyjny łączenia systemów otwartych



RYSUNEK 3.15. Wykorzystane warstwy komunikacyjne w odniesieniu do modelu ISO/OSI

obranych parametrów transmisji, do rejestru konfiguracyjnego bloku komunikacji szeregowej (USART) mikrokontrolera. Przyjęte wartości zaprezentowano w Tab. 3.5, natomiast implementacja funkcji widoczna jest poniżej:

```
void USART_init(void)
{
    UBRRH = (unsigned char)((((16000000/(9600*161))-1)>>8); // Set baudrates
    UBRRL = (unsigned char)((((16000000/(9600*161))-1);
    // Enable receiver and transmitter
    UCSRB = _BV(RXEN) | _BV(TXEN) | _BV(RXCIE | 0<<TXCIE);
    // Set frame format: 8data, 2stop bit, even
    UCSRC = (1<<URSEL)|(1<<USBS)|(3<<UCSZ0);
}
```

TABLICA 3.5. Parametry transmisji z wykorzystaniem interfejsu RS-232

Szybkość transmisji	9600 b/s
Liczba danych	8bit
Bit parzystości	even
Stop	2bit

Za odbiór oraz przesyłanie danych bezpośrednio znak po znaku, odpowiedzialne są dwie funkcje: `USART_sendch()` oraz `USART_receivech()`. Obsługa pierwszej z nich, tj. wysyłania danych, w pełni zdeterminowana jest przez realizowany program oraz zależna od aktualnego trybu pracy urządzenia. W przypadku drugiej funkcji – odbioru danych

ZNAK POCZĄTKU	ADRES URZĄDZENIA	NR FUNKCJI	DANE	ZNAK KOŃCA
1 znak „<”	1 znak	1 znak	4 znaki	1 znak „.”

RYSUNEK 3.16. Ramka komunikacyjna protokołu

– warto nadmienić, iż jej uruchomienie następuje wówczas, gdy do sterownika zaczynają napływać dane np. od strony komputera PC. Wykorzystano w tym celu wektor przerwania nr 12 o adresie \$016 pochodzący z układu USART (TXC) – informujący o odebranych znaku. Po zgłoszeniu przerwania mikrokontroler zawiesza na czas obsługi przerwania wykonywany program i przechodzi do realizacji wskazanego zadania. W tym przypadku jest to odczyt otrzymanego znaku z bufora UDR interfejsu oraz zapisanie go w buforze programu. Takie rozwiązanie eliminuje konieczność ciągłego testowania w pętli flagi rejestru układu USART, czy przypadkiem nie rozpoczęła się transmisja znaków, oszczędzając tym samym czas procesora.

Nieco wyższym poziomem, na którym odbywa się wymiana danych, jest nadmieniona warstwa aplikacji modelu OSI. Jej podstawą jest zaproponowany na potrzeby obsługi systemu, protokół komunikacyjny. Transmisja oraz odbiór realizowane są w oparciu o ramkę protokołu, segregującą w określonym porządku bloki danych. Przesyłanie danych odbywa się w przyjętym trybie ASCII⁹ z kodowaniem znaków w systemie heksadecymalnym. Są

TABLICA 3.6. Lista funkcji dostępnych w obrębie protokołu.

Numer funkcji	Dane	Opis
0	Brak	Test komunikacji
1	Brak	Test podłączenia pomp
2	Maksymalna wart. 0xFFFFh	Zapis dowolnej komórki rejestru
3	Brak	Odczyt dowolnej komórki rejestru
4	0x1h (START), 0x0h (STOP)	Obsługa mieszadła
5	0x1h (START), 0x0h (STOP)	Wyzwolenie dozowania
6	Brak	Stop systemu
7	Brak	Reset sterownika

⁹ ASCII (ang. American Standard Code for Information Interchange) – 7-bitowy kod przyporządkowujący liczby z zakresu 0-127 literom (alfabetu angielskiego), cyfrom, znakom przestankowym i innym symbolom oraz poleceniom sterującym

to znaki z przedziału $0-9$ oraz $A-F$. Widoczna na Rys. 3.16 zaproponowana ramka komunikacji, podzielona została na pięć segmentów. Pierwszy z nich zawiera znak początku w postaci „<”, informujący o rozpoczęciu transmisji zgodnej z protokołem. Kolejnym jest pole adresu urządzenia. Co prawda komunikacja odbywa się w relacji 1:1 (komputer – sterownik), lecz aby poprawny sposób odwołać się do wybranego rejestru urządzenia, koniecznym jest jego identyfikacja liczbowa. Blok trzeci to informacja o wyborze funkcji, jaka ma zostać zrealizowana. Dostępne funkcje wyszczególniono w Tab. 3.6. Blok danych zajmuje 4. pozycje w kolejności i mieści cztery znaki kodu ASCII. Zwykle pierwszy z nich służy do określenia adresu komórki, przy realizacji funkcji odczytu czy też zapisu rejestru. Ostatnim znakiem ramki jest „:”, oznacza on zakończenie całego bloku. Po otrzymaniu znaku końca zbuforowana ramka może zostać przetworzona. Funkcje obsługi protokołu umieszczone zostały w pliku *prot.c*. Za odpowiednią interpretację otrzymanych danych odpowiada funkcja `PROT_execute()`. Jej głównym zadaniem jest, na podstawie komórki 3. ramki, odczytanie numeru funkcji protokołu oraz przekazanie sterownia do niej.

Rozdział 4

Oprogramowanie użytkownika systemu

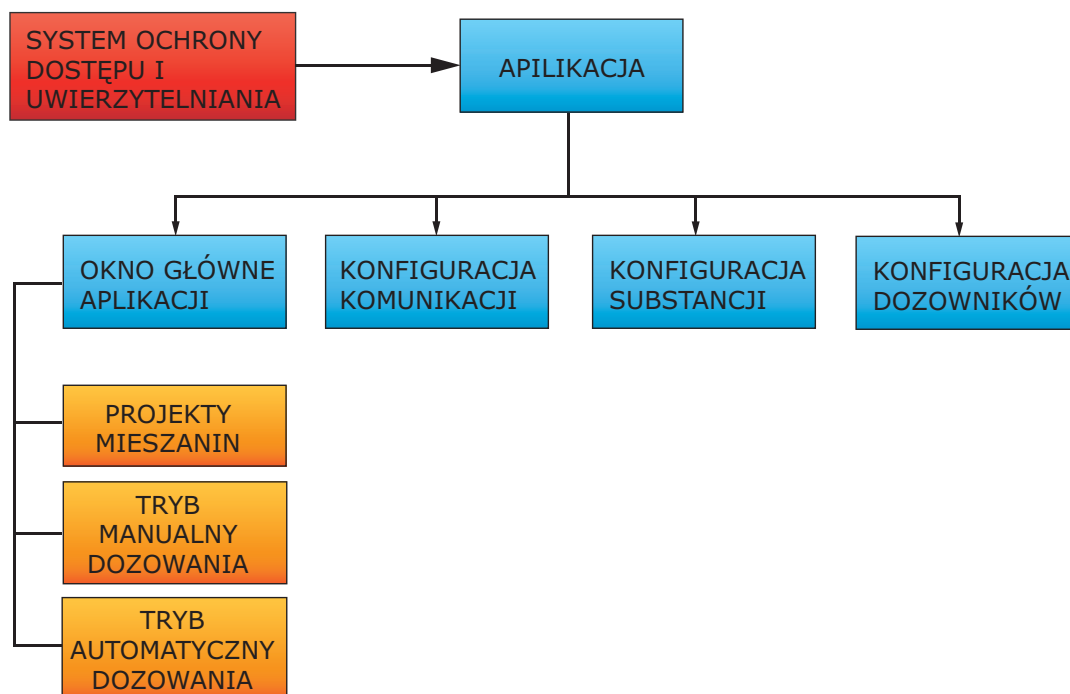
4.1. Idea programu narzędziowego

Jednym z założeń funkcjonowania i obsługi automatycznego systemu przygotowywania mieszanin cieczy oraz pozycją na liście zakresu prac jest projekt oprogramowania narzędziowego na komputer PC. Powstałe oprogramowanie ma charakter interfejsu użytkownika, stanowiąc tym samym warstwę sterowania nadrzędnego systemu. Zanim jednak przystąpiono do realizacji programu, istotnym było zdefiniowanie potrzeb oraz stawianych mu wymagań. Do najistotniejszych funkcji, jakie powinny być przezeń realizowane, można zaliczyć:

- Komunikacja ze sterownikiem systemu dozowania z wykorzystaniem zaproponowanego protokołu oraz obsługa jego funkcji.
- Konfiguracji parametrów procesu dozowania oraz urządzeń.
- Podgląd aktualnego stanu procesu.
- Projektowanie roztworów z hierarchią substancji wchodzących w ich skład. Grupowanie projektów przez zdefiniowane przez użytkownika katalogi wewnętrzne aplikacji.

4.2. Funkcje oraz struktura interfejsu graficznego

Wykonany program o nazwie „*Dosing System Interface 1.0*” pełni funkcję rozbudowanego interfejsu użytkownika dla systemu dozowania i przygotowywania mieszanin. Poza wymienionymi założeniami, które znalazły swoją implementację, został on poszerzony o dodatkowe opcje czyniące go bardziej użytecznym. Na Rys. 4.1 zaprezentowano główny podział aplikacji na bloki realizujące poszczególne funkcje.

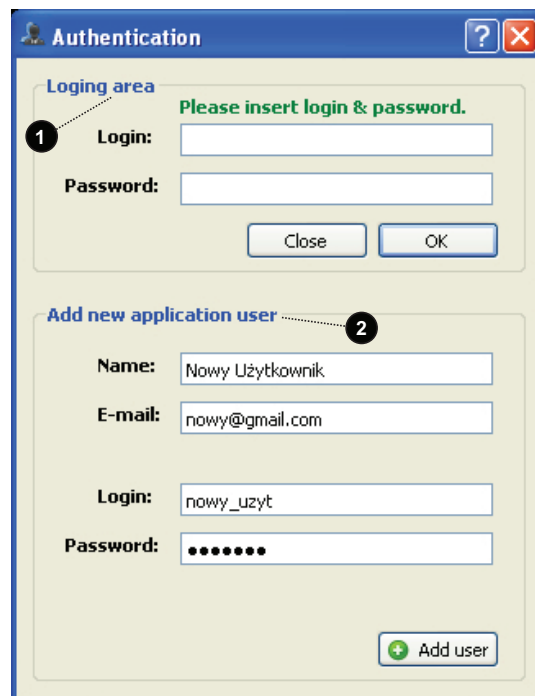


RYSUNEK 4.1. Główny podział interfejsu graficznego aplikacji

4.2.1. Uwierzytelnianie użytkownika

Pierwszym elementem widocznym zaraz po uruchomieniu programu jest okno uwierzytelniania użytkownika. Związane jest ono z modułem zarządzania użytkownikami wchodzącym w skład aplikacji. Jako że przewiduje się, iż z systemu przygotowywania mieszanin będzie korzystać grupa osób, koniecznym było zapewnienie separacji „warsztatu pracy” każdej z nich. Poza funkcją katalogującą dane poszczególnych klientów aplikacji, stanowi również swego rodzaju zabezpieczenie przed dostępem osób niepowołanych. W tym miejscu trzeba nadmienić, że wszystkie dane aplikacji, w tym dane jej użytkowników przechowywane są w bazie danych. Oznacza to, że dostęp do nich możliwy jest jedynie po zalogowaniu do programu bądź serwera bazy danych. Tematyka związana z technologią aplikacji, szerzej poruszona zostanie w dalszej części rozdziału.

Zaprezentowane na Rys. 4.6 okno dialogowe podzielone zostało na dwa obszary. Pierwszy z nich służy do logowania. Po wpisaniu odpowiednich danych, tj. nazwy użytkownika oraz hasła i potwierdzeniu ich przyciskiem „OK”, zostaniemy przeniesieni do głównego okna aplikacji. W przypadku gdy dane okażą się nieprawidłowe, fakt ten zostanie zakomunikowany. Za pomocą widocznego w obrębie drugiego obszaru formularza, istnieje



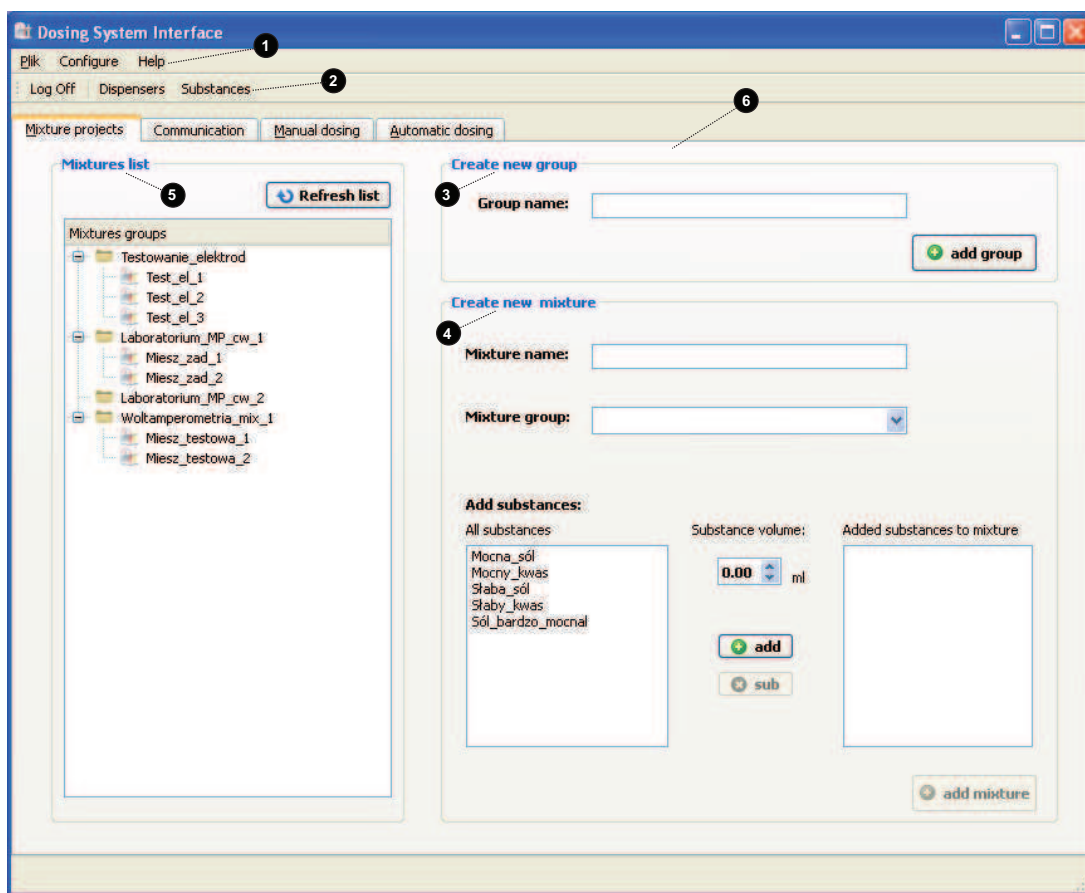
RYSUNEK 4.2. Okno dialogowe uwierzytelniania użytkowników

Podział okna dialogowego: 1 - obszar logowania, 2 - obszar rejestracji nowego użytkownika programu

możliwość założenia konta nowego użytkownika. Po dokonaniu tej czynności można przejść od razu do logowania.

4.2.2. Główna aplikacja

Po pomyślnym przejściu procesu uwierzytelnienia, użytkownik otrzymuje dostęp do aplikacji. Na Rys. 4.3 zaprezentowany został zrzut ekranu głównego jej okna. Elementem zajmującym największą jego powierzchnię jest blok z czterema zakładkami, reprezentującymi główne zadania aplikacji. Należą do nich: „*Mixtures Projects*” – projekty mieszanin, „*Communication*” – uruchomienie komunikacji, „*Manual dosing*” – tryb manualny dozowania, „*Automatic dosing*” – tryb automatyczny dozowania mieszanin. Ich funkcjonalnościom poświęcone zostały dalsze rozdziały. W górnej części aplikacji znajduje się menu główne, z podziałem na trzy sekcje. Pierwsza z nich to menu „*File*” zawierająca podstawowe akcje, takie jak wyjście z programu lub zmiana użytkownika. Kolejna, o nazwie „*Configure*” służy do konfiguracji między innymi parametrów komunikacji, dozowników oraz substancji. Po wybraniu pozycji „*Help*” uzyskamy podstawowe informacje o programie. Dzięki paskowi skrótów, umieszczonemu pod menu głównym, użytkownik otrzymuje

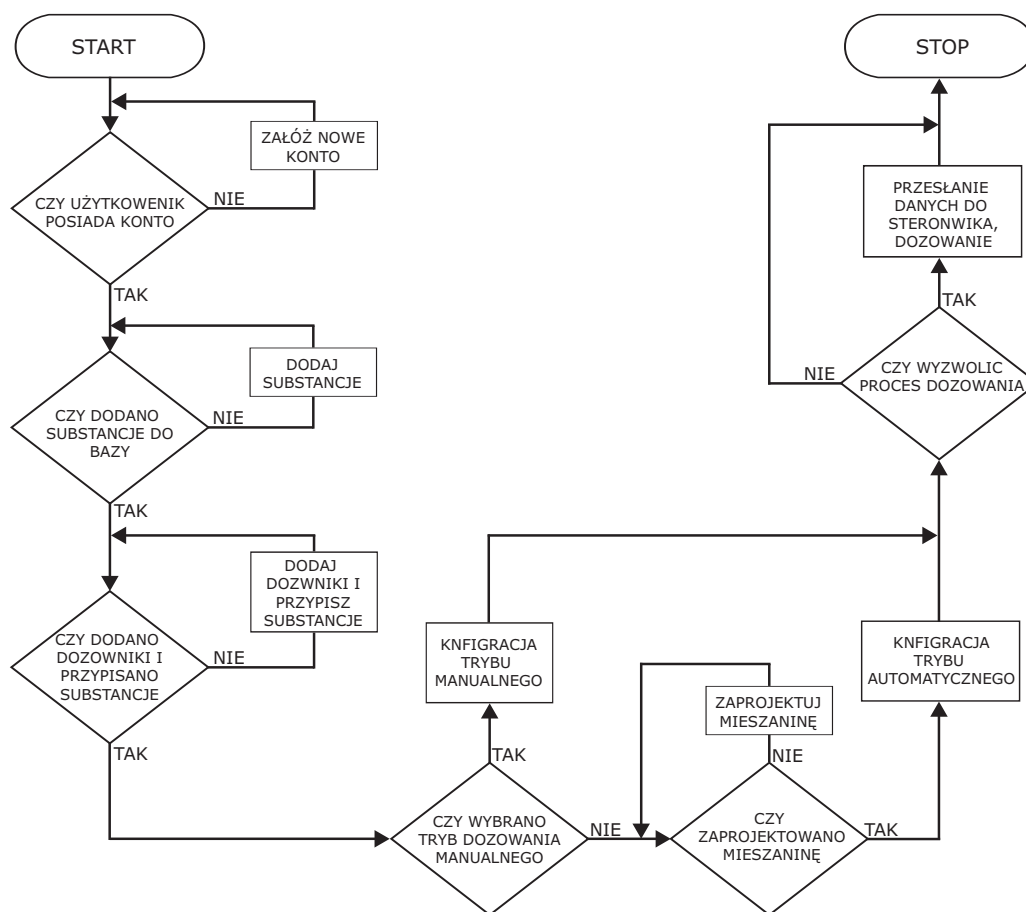


RYSUNEK 4.3. Okno główne aplikacji wraz z zakładką projektowania mieszanin cieczy

Podział okna: 1 – menu główne aplikacji, 2 – pasek skrótów, 3 – obszar tworzenia nowej grupy/katalogu, 4 – obszar projektowania mieszanin cieczy, 5 – obszar podglądu hierarchii grup z mieszaninami, 6 – blok zakładek

szybki dostęp do najważniejszych akcji, w tym: wylogowanie, konfiguracja dozowników, konfiguracja substancji, połączenie ze sterownikiem.

Zgodnie z założeniami, aplikacja „*Dosing Sysystem Interface 1.0*” służy do projektowania mieszanin cieczy oraz ich przygotowywania, we współpracy z częścią sprzętową systemu (sterownik, dozowniki). Jest to oczywiście uogólnienie jej znaczenie, ponieważ jak zademonstrowano na Rys. 4.1 składa się ona z kilku odrębnych modułów, dających szerokie możliwości konfiguracyjne. Proces projektowania mieszanin cieczy jest czynnością wieloetapową. Aby poznać jej prawidłowy przebieg, warto prześledzić kolejne kroki

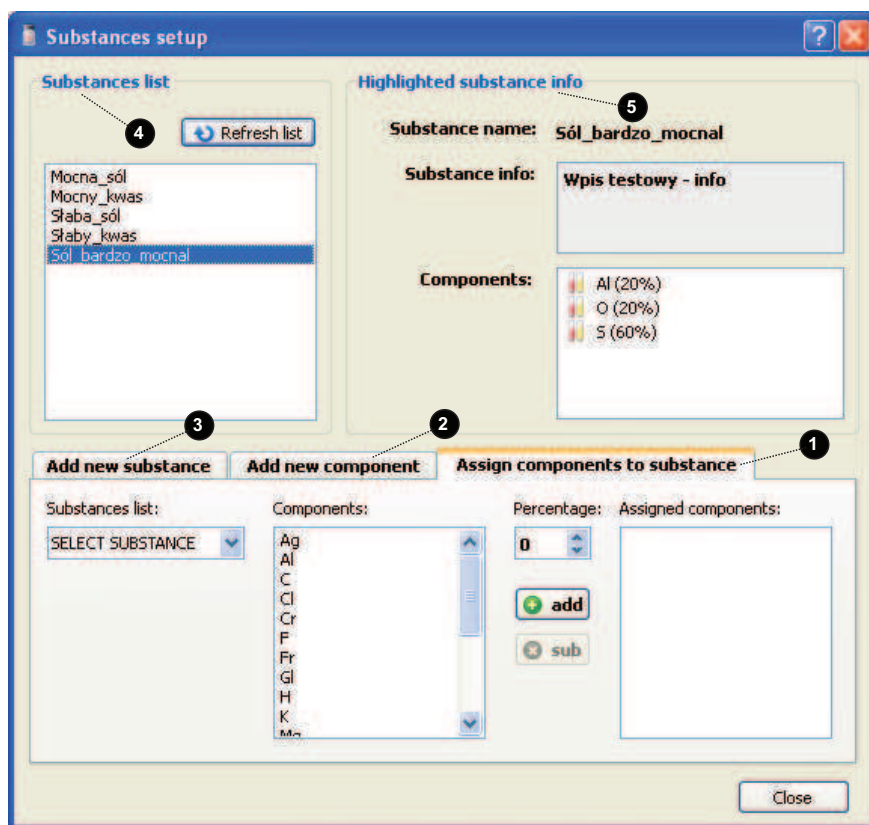


RYSUNEK 4.4. Diagram kolejnych etapów projektowania i przygotowywania mieszanin cieczy

postępowania. Pomocnym w tym może być zaprezentowany na Rys. 4.4 diagram następujących po sobie faz, prowadzących ostatecznie do powstania projektu, przeprowadzenia konfiguracji warstwy sprzętowej oraz wyzwolenia procesu dozowania.

4.2.3. Konfiguracja substancji

Wybór z menu głównego, sekcji „Configure” opcji „Substances Setup” spowoduje pojawienie się okna dialogowego konfiguracji substancji. Zrzut ekranu tejże formatki, zaprezentowany został na Rys. 4.5. Dolną jej część, zajmuje blok zakładek, zawierające kolejne funkcje: „Add new substance” – dodawanie nowych substancji, „Add new component” – dodawanie nowych związków (składników substancji), „Assign components to substance” – przypisanie określonej substancji zawartości procentowej wybranych składników. Górna część okna ma charakter informacyjny. Pozwala między innymi na podgląd informacji o dodanych substancjach oraz przypisanych im składników.

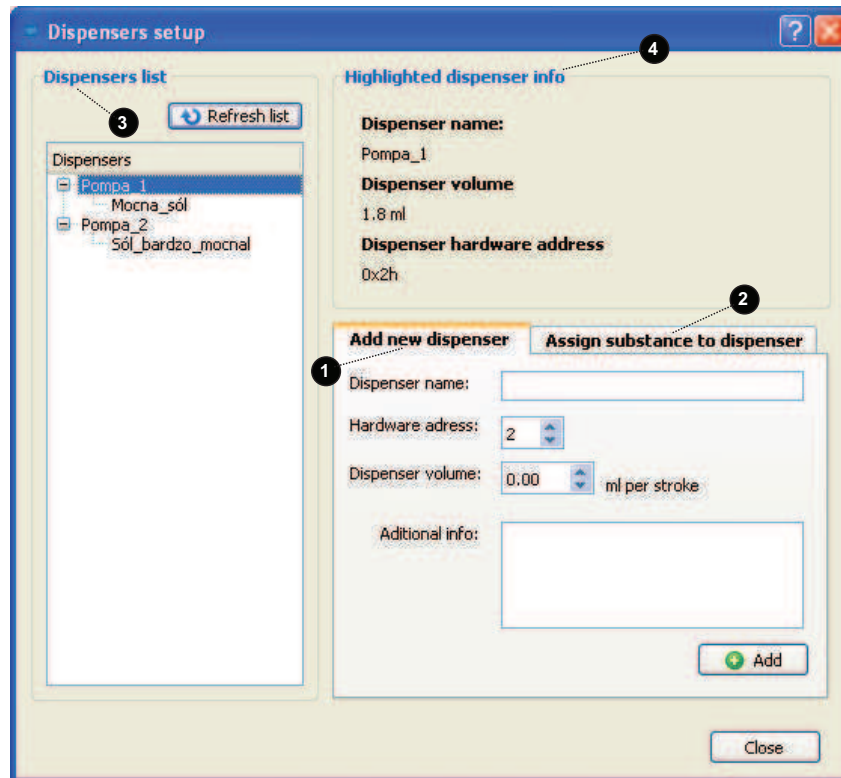


RYSUNEK 4.5. Okno dialogowe konfiguracji substancji

Podział okna dialogowego: 1 – zakładka przypisywania składników (związków/pierwiastków) substancjom, 2 – zakładka dodawania nowych składników dla substancji, 3 – zakładka dodawania nowych substancji, 4 – lista dostępnych substancji, 5 – obszar podglądu substancji

4.2.4. Konfiguracja dozowników

Kolejnym krokiem przygotowywania bazy dla przyszłych projektów mieszanin, jest konfiguracja urządzeń dozujących. Aby przejść do tej części aplikacji, należy z głównego menu wybrać „*Configuration—>Dispensers Setup*” lub skorzystać z ikony na pasku skrótów. Zrzut ekranu okna dialogowego dozowników umieszczono na Rys. 4.6. W lewej jego części widoczna jest lista dostępnych w systemie urządzeń dozujących wraz z przypisanymi im substancjami. Po zaznaczeniu wybranej pompy, w prawym górnym rogu pojawi się szereg związanych nią informacji. Pierwsza zakładka widocznego w dolnej części bloku, tj. „*Add new dispenser*”, służy do włączania w aplikację nowych dozowników. Należy kolejno podać jego nazwę, na potrzeby programu, adres sprzętowy z listy 2 – 15, objętość dawki w ml oraz dodatkowe informacje. Zakładka „*Assign substance to dispenser*” pozwala na przypisanie wybranemu urządzeniu dozującemu określonej substancji, która to aktualnie



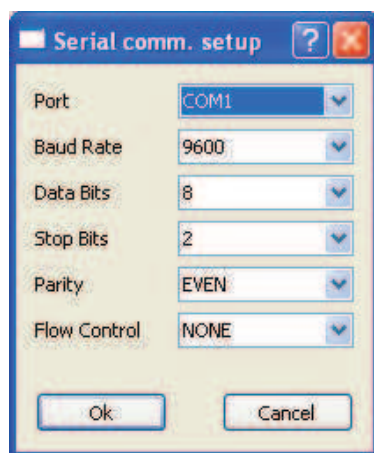
RYSUNEK 4.6. Okno dialogowe konfiguracji urządzeń dozujących

Podział okna dialogowego: 1 – zakładka dodawania dozowników, 2 – zakładka przypisywania dozownikowi substancji, 3 – lista dostępnych dozowników, 4 – podgląd parametrów wybranego dozownika

jest do niego połączona. Jest to istotna czynność, gdyż od poprawności przeprowadzonej konfiguracji zależą następne etapy oraz pojawiające się tam dane.

4.2.5. Konfiguracja komunikacji

Ostatnią już pozycją na liście konfiguracji programu jest parametryzacja komunikacji szeregowej. Do widocznego na Rys. 4.7 okna dostać się można poprzez menu główne „*Configuration—>Communication Setup*”. Prawidłowość jej przeprowadzenia bezpośrednio rzutuje na możliwość prowadzenia jakiejkolwiek transmisji w kierunku sterownika, a tym samym wpływu na sterowanie warstwą sprzętową systemu. Standardowymi ustawieniami w programie są również ustawieniami sterownika. Dotyczy to szybkości transmisji, liczba bitów danych i stopu, kontroli parzystości oraz obsługi kontroli. Pamiętać należy jednak o wyborze odpowiedniego portu COM (RS-232) w komputerze PC, gdyż nie zawsze zgodny jest ze standardową konfiguracją.

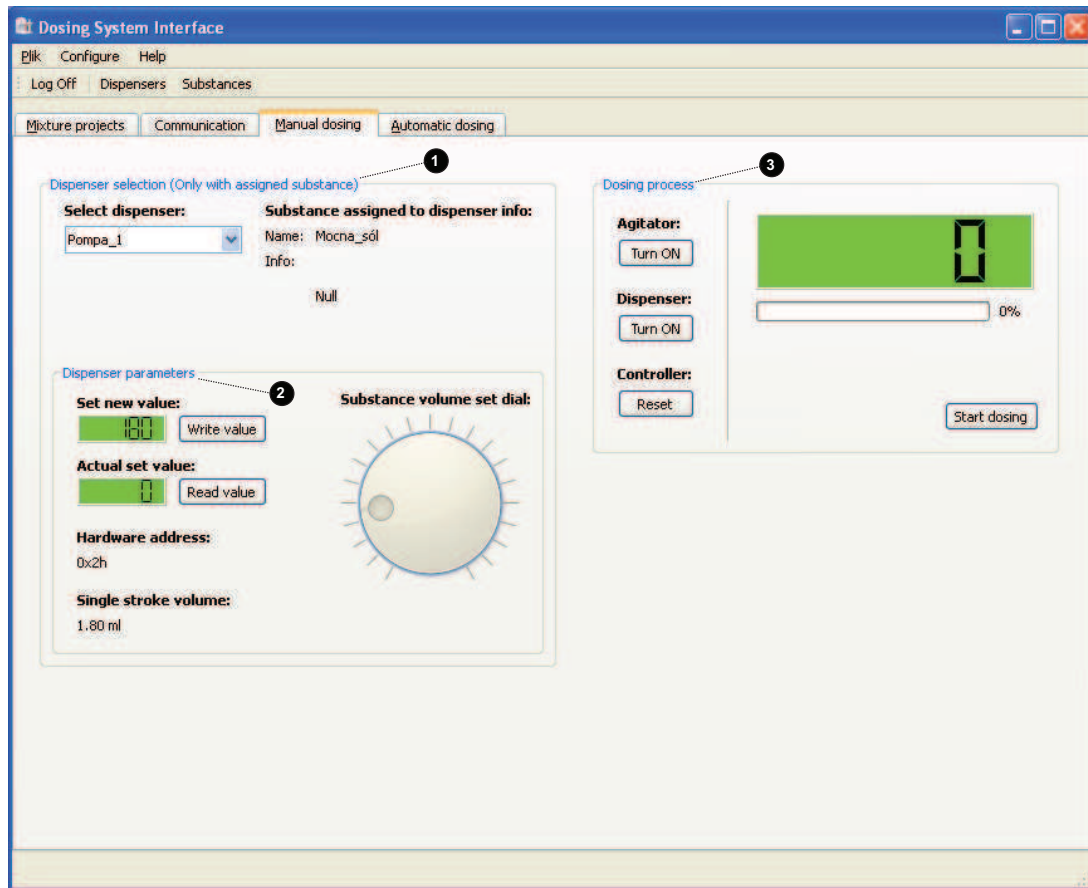


RYSUNEK 4.7. Okno dialogowe parametryzacji komunikacji szeregowej

4.2.6. Projektowanie mieszanin

Poprawnie przeprowadzona konfiguracja programu jest podstawą do realizacji dalszych kroków. Kolejnym etapem w procesie przygotowania mieszaniny jest jej projekt. Temu zadaniu służy pierwsza i zarazem kluczowa zakładka „*Mixtures projects*”, zademonstrowanego na Rys. 4.3 okna głównego aplikacji. Jej powierzchnia podzielona została na trzy oddzielne obszary. Aby ułatwić przyszłemu użytkownikowi segregację projektów, zaproponowano wewnętrzny system katalogowania. W celu założenia grupy (katalogu) należy skorzystać z obszaru „*Create new group*” wpisując jej nową nazwę oraz potwierdzając przyciskiem „*add group*”. Obszar o etykiecie „*Create new mixtures*” jest najistotniejszą funkcją tej zakładki. Za jego pomocą użytkownik projektuje nową mieszaninę. Formularz obejmuje następujące pola: „*Mixture name*” – nazwa nowej mieszaniny, „*Mixture group*” – grupa (katalog) do którego ma należeć, „*Add substances*” – służy przypisaniu wcześniej dodanych substancji, dostępnych w obrębie aplikacji. Potwierdzenie wyboru przyciskiem „*add mixture*” powoduje zapis projektu do bazy danych. Istniejące bądź nowo dodane projekty, wraz ze strukturą katalogów prezentowane są w obrębie obszaru „*Mixtures list*”. Jego zawartość odświeżana po kliknięciu przycisku „*refresh list*” lub po pomyślnym utworzeniu projektu.

Opisane czynności są ostatnią fazą związaną z projektowaniem mieszaniny w postaci wirtualnej. Jeśli użytkownik nie wyraża chęci przygotowania mieszaniny w sposób fizyczny, można na tym etapie zakończyć pracę i wrócić do niej, gdy zajdzie taka potrzeba. W przeciwnym wypadku należy podjąć decyzję o wyborze jednego z dwóch dostępnych trybów dozowania: tryb manualny bądź automatyczny.



RYSUNEK 4.8. Okno główne aplikacji wraz z zakładką automatycznego trybu dozowania

Podział okna dialogowego: 1 – obszar wyboru urządzenia dozującego, 2 – obszar parametryzacji dozowania, 3 – obszar wyzwalania oraz podglądu procesu dozowania

4.2.7. Tryb manualny dozowania

Zrzut ekranu okna manualnej obsługi procesu dozowania zaprezentowano na Rys. 4.8. Okno podzielone zostało na dwa główne obszary. Pierwszy z nich – „*Dispenser selection*” służy do wyboru, dostępnego na liście, urządzenia dozującego. Prawidłowy wybór powoduje pojawienie się informacji o substancji przypisanej do niego. Dolna część obszaru zawiera konfigurację parametrów dozowania. Możliwy jest odczyt aktualnej wartości objętości z rejestru dozownika w sterowniku oraz zapis, po uprzednim jej ustawieniu przy pomocy pokrętła „*Substance volume set dial*”.

Drugi obszar, tj. „*Dosing process*” stanowi podstawową obsługę oraz podgląd procesu dozowania. Główny przycisk „*Start dosing*” wyzwała dozowanie. Możliwe jest również

uruchomienie mieszadła, oraz ewentualny reset całego sterownika jeśli pojawi się taka konieczność. Obiekt przypominający duży wyświetlacz służy do podglądu aktualnej objętości substancji, jaka została już wstrzyknięta.

4.2.8. Tryb automatyczny

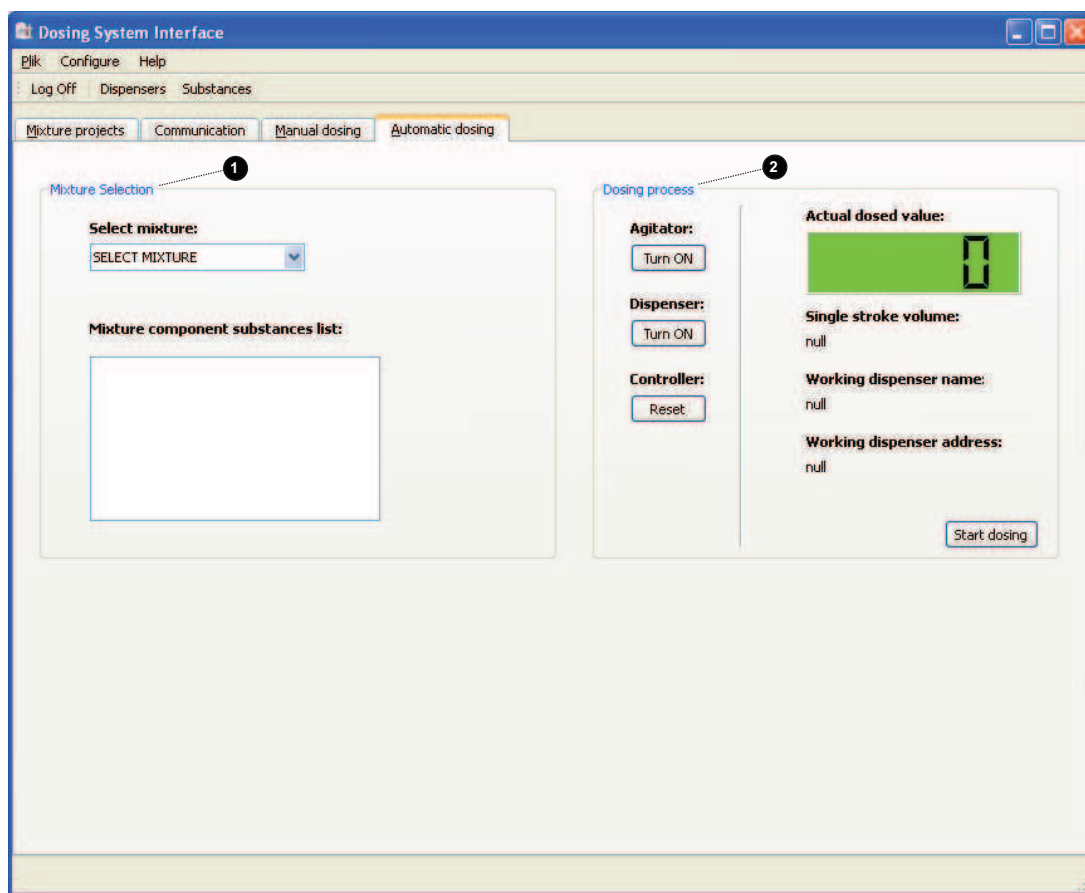
Zakładka trybu automatycznego widoczna jest na Rys. 4.9. Pierwszy z obszarów na jakie została podzielona – „*Mixture selection*” umożliwia wybór jednej z zaprojektowanych mieszanin oraz podgląd substancji składowych. Obszar „*Dosing process*” podobnie jak w trybie manualnym daje pełną kontrolę nad procesem. W odróżnieniu do trybu manualnego nie ma konieczności parametryzacji objętości, dobywa się ona w sposób automatyczny. Po wyzwoleniu procesu przyciskiem „*Start dosing*” dane o objętości wpisywane zostają do odpowiednich rejestrów pomp. Dane w podglądzie zależne są od aktualnie pracującego urządzenia.

4.3. Technologia

Niezwykle istotnym etapem projektowania aplikacji jest jej dokładne zaplanowanie. Koniecznym jest zdefiniowanie wszelkich potrzeb oraz wymagań jakie ma ona spełniać. W tym celu wyznaczono główny jej cel oraz szereg pośrednich, tworząc tym samym hierarchię priorytetów. W procesie kształtowania przyszłej funkcjonalności aplikacji pomocna była analiza możliwych scenariuszy pracy oraz akcji użytkownika. Ze względu na fakt, iż proces programowania jest zwykle czynnością czasochłonną, warto podzielić go na kolejne etapy wykonawstwa [29]. Na podstawie planu oraz listy potrzeb oprogramowania podjęto decyzję o strukturze aplikacji, wykorzystywanej technologii oraz narzędzi potrzebnych do jej realizacji.

4.3.1. Narzędzia i oprogramowanie

Dedykowane oprogramowanie „*Dosing System Interface 1.0*” w pełni napisane zostało w języku C++. Język ten jest prawdopodobnie najpopularniejszym językiem programowania wyższego poziomu. Jego standard – ISO/ANSI zdefiniowany został w dokumencie



RYSUNEK 4.9. Okno główne aplikacji wraz z zakładką automatycznego trybu dozowania

Podział okna dialogowego: 1 – obszar wyboru zaprojektowanej mieszaniny oraz podglądu substancji składowych, 2 – obszar podglądu procesu dozowania

normalizującym ISO/IEC 14882 i w świecie informatyki ma silnie ugruntowaną pozycję [17]. C++ jest językiem programowania ogólnego przeznaczenia dającym programiście nieograniczone możliwości kodowania. Silną jego stroną jest niewątpliwie obsługiwany paradygmat programowania obiektowego. Pozawala on na podziału kodu na bloki (klasy) realizujące określone funkcje. Każda klasa może być odzwierciedleniem obiektów rzeczywistego świata, w świecie abstrakcji programu. Funkcjonalność tychże klas można rozwijać poprzez dodawanie kolejnych metod (odpowiedników funkcji w paradygmacie programowania imperatywnego). Biblioteka standardowa języka jest bardzo dobrze wyposażona i zawiera dużą liczbę użytecznych klas.

4.3.1.1. Baza danych. Rozbudowana struktura programu powoduje, iż koniecznym jest przechowywanie dużej ilości danych. Wraz z czasem i zmieniającą się liczbą użytkowników objętość danych może poważnie się zwiększać. Popularnymi sposobami gromadzenia i przechowywania danych w aplikacjach są pliki jednorodne oraz bazy danych. Pierwsze rozwiązanie, przy dużej ilości danych, obarczone jest wieloma ograniczeniami [9, 40]. Należą do nich:

- Powolna praca z plikiem o dużej objętości.
- Problem z wyszukiwaniem konkretnych wierszy w grupie rekordów. Wymagane jest określenie sposobu gromadzenia danych oraz ich przeszukiwania.
- W przypadku, gdy z pliku korzysta wiele aplikacji, wielu użytkowników w jednym czasie, dostęp do niego stanowi wąskie gardło.
- Procesy na plikach realizowane są w sposób sekwencyjny. W celu dotarcia do poszukiwanych danych należy przetworzyć cały plik.
- Poza systemowymi zabezpieczeniami nie ma kontroli dostępu na różnych poziomach.

Rozwiązaniem wszystkich powyższych problemów jest skorzystanie z drugiej wspomnianej metody przechowywania danych – relacyjnej bazy danych. Do najważniejszych cech i zarazem zalet RDBMS¹ należą:

- Szybki dostęp do danych.
- Przeszukiwanie danych zgodnie z kryteriami zawartymi w zapytaniu.
- Równoległy dostęp grupy użytkowników i aplikacji.
- Rozbudowana hierarchia poziomów dostępu oraz możliwość nadawania przywilejów.
- Język zapytań SQL pozwalający na modyfikację bazy oraz edycję danych w niej zawartych.

Przeważające korzyści oraz konieczność gromadzenia dużej ilości danych sprawiły, iż w projekcie zdecydowano się zastosować system relacyjnej bazy danych MySQL. MySQL jest produktem firmy MySQL AB, w toku wielu przejęć, rozwijanym na chwilę obecną przez firmę Oracle. Wykorzystana wersja 5.0 to produkt nieodpłatny, rozpowszechniany

¹ RDBMS (ang. Relational Database Management Systems) – określenie systemu bazodanowego opierającego się na modelu relacyjnym.

w oparciu o licencje GPL². MySQL jest niezwykle popularnym systemem, uważanym za jeden ze stabilniejszych i najszybciej działających z dostępnych na rynku RDBMS [7].

Aby baza danych spełniała swoje funkcje, należy zaprojektować odpowiedni jej model. Mianem modelu bazy określa się strukturę tabel wraz z zawartymi w nich kolumnami. Na tym etapie ważnym było scharakteryzowanie, jakiego typu dane będą gromadzone i w jakim porządku. W przygotowaniu modelu, a później jego uruchomieniu posłużono się darmowym pakietem MySQL Workbench dostarczonym przez producenta bazy. Jest to zestaw narzędzi umożliwiających edycję struktury bazy danych przy pomocy interfejsu graficznego. Po przeprowadzeniu uprzedniej konfiguracji otrzymujemy dostęp do wybranej bazy. Posiada również interfejs sprawdzania poprawności i przesyłania zapytań w języku SQL. Na Rys. 4.10 zaprezentowano model działającej bazy danych aplikacji. Widoczne na tym samym rysunku obiekty w formie prostokątów reprezentują strukturę tabeli. Kolejne pozycje w nich zawarte to kolumny wraz z nazwą oraz typem przechowywanych danych. Linie łączące tabele symbolizują relacje je łączące. Sposób zakończenia linii charakteryzuje jeden z rodzajów relacji w tym: 1:1, 1:N, N:N.

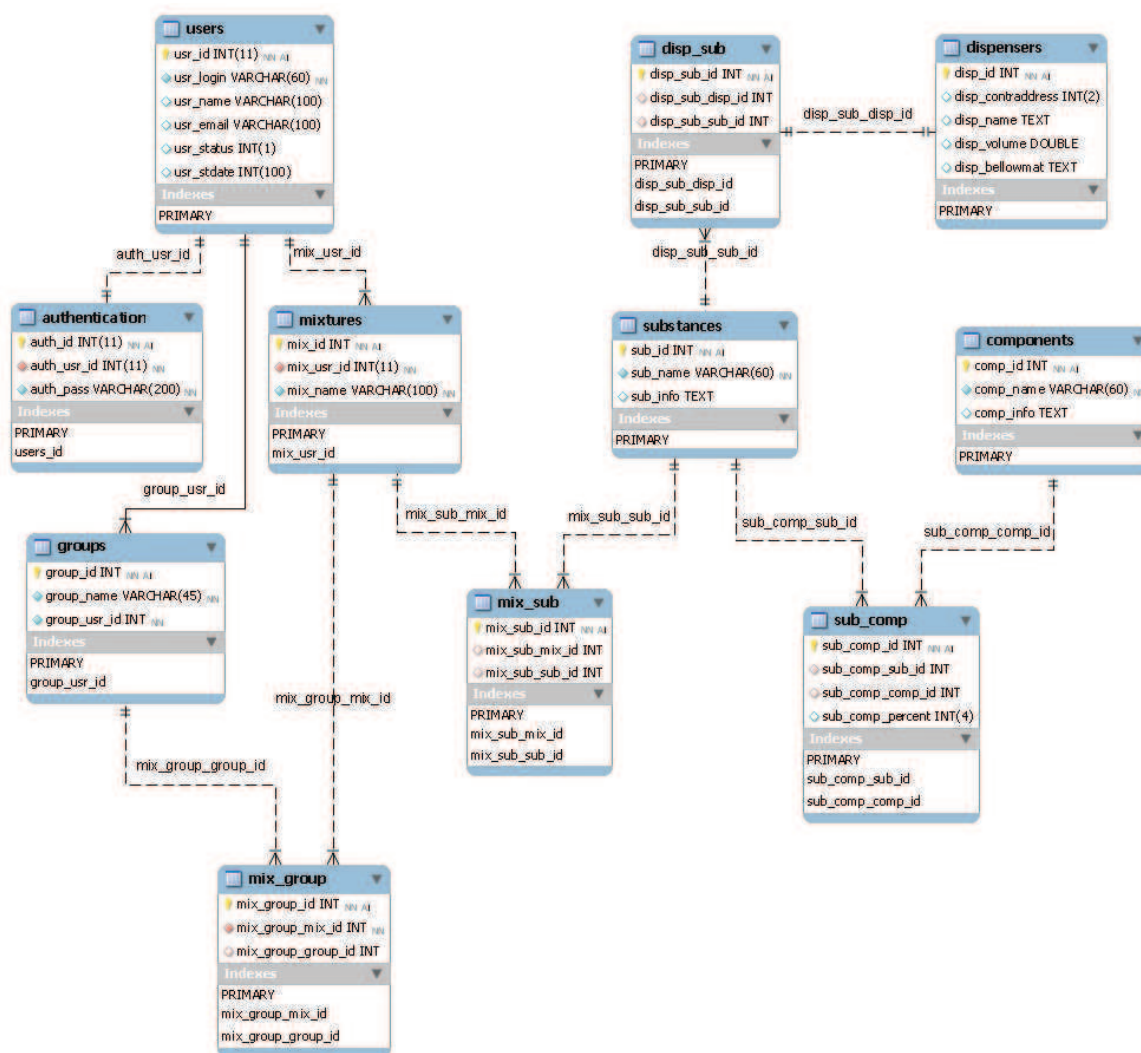
4.3.1.2. Biblioteki Qt. Ponieważ jednym z wymagań dotyczących aplikacji była szybka i intuicyjna możliwość obsługi, koniecznym było wyposażenie jej w interfejs graficzny. W tym celu posłużono się pakietem SDK Qt zapoczątkowanym przez norweską firmę Trolltech, rozwijanym obecnie przez szwedzką Nokię. Podobnie jak MySQL pakiet programistyczny Qt SDK dostępny jest nieodpłatnie w ramach licencji GNU. W skład jego wchodzi następujące narzędzia:

- Qt 4 framework³ – biblioteki programistyczne,
- Qt Creator – zintegrowane z frameworkiem środowisko edycji kodu,
- Qt Assistant – rozbudowany system pomocy,
- Qt Designer – aplikacja służąca do budowy elementów GUI⁴,
- qmake - moduł zarządzania procesem kompilacji.

² GPL (ang. GNU General Public License) – licencja wolnego i otwartego oprogramowania stworzona w 1983 roku przez Richarda Stallmana.

³ framework (rama projektowa, wzorzec projektowy) – zbiór klas, bibliotek wspomagających proces budowania aplikacji.

⁴ GUI (ang. Graphical User Interface) – środowisko graficzne, warstwa aplikacji pozwalająca na interakcję z użytkownikiem przy pomocy graficznych elementów

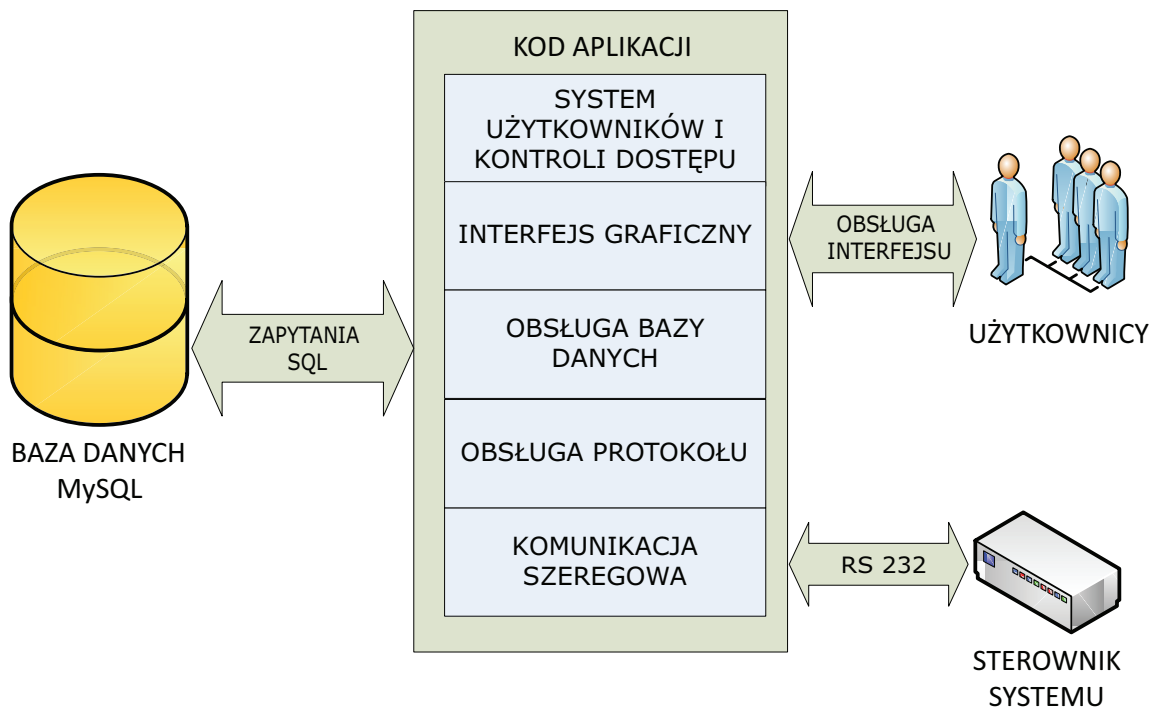


RYSUNEK 4.10. Model bazy danych

Qt 4 to wyspecjalizowany zestaw przenośnych bibliotek dla języka C++, umożliwiający programowanie aplikacji o graficznym interfejsie. Główną myślą przewodnią jego twórców jest „write once, compile anywhere” co oznacza, iż napisane oprogramowanie jest przenośne i niezależne od platformy [6]. Jego nieocenioną zaletą jest wsparcie dla następujących platform: Windows (98, NT, XP, 2000, Vista), Mac OSX, Linux, Solaris, HP-UX oraz szereg systemów wbudowanych.

Elementy graficzne interfejsu użytkownika modelowanego w Qt 4, mimo iż stanowią część okna, ułożone są w odpowiedniej hierarchii [12]. Framework wprowadza pewien porządek, względem którego winno się projektować aplikację. Najczęściej używaną klasą, będącą podstawą budowy okna głównego programu, jest klasa `QMainWindow`. W obrębie powstałego okna można osadzać – dokować poszczególne elementy aplikacji, tzw. widżety.

Bazą dla tworzenia nowych oraz tych dostępnych w bibliotece jest klasa `QWidget`. Cechą charakterystyczną dla Qt 4 jest podejście do integracji ze sobą poszczególnych elementów kodu oraz GUI. Służy do tego nowoczesny mechanizm sygnałów (signals) i gniazd (slots) oraz system obsługi zdarzeń.



RYSUNEK 4.11. Organizacja modułów kodu aplikacji

4.3.2. Struktura aplikacji

W procesie modelowania struktury powstałej aplikacji kierowano się dwiema głównymi funkcjami jakie spełnia. Z jednej strony stanowi interfejs graficzny dla operatora systemu dozowania. Realizuje warstwę sterowania pośredniego urządzeniami wykonawczymi, analogicznie do bardziej rozbudowanych aplikacji przemysłowych SCADA⁵. Z drugiej strony jest środowiskiem do projektowania oraz archiwizacji mieszanin cieczy dodatkowo wyposażonym w system uwierzytelniania użytkowników.

Zaproponowana struktura powstałej aplikacji zaprezentowana została na Rys. 4.11. Składa się ona z sześciu podstawowych bloków oprogramowania, realizujących kluczowe dla programu zadania.

⁵ SCADA (ang. Supervisory Control And Data Acquisition) – przemysłowy system nadzoru procesu technologicznego lub działania maszyn

4.3.2.1. Implementacja komunikacji szeregowej. W celu uruchomienia komunikacji z wykorzystaniem interfejsu RS-232 posłużono się biblioteką WinComPort, będącą dodatkiem (pluginem) dla frameworka QT 4. Bazuje ona na standardowym interfejsie programistycznym WinAPI będącym częścią systemów z rodziny Windows. Dostęp to biblioteki systemu – WinAPI można uzyskać po dodaniu do kodu programu charakterystycznego nagłówka `<windows.h>`. Jedną z wielu warstw systemowych, na których obsługę pozwala, jest dostęp do portów fizycznych komputera PC. Biblioteka WinComPort, jako łącznik na drodze framework QT – WinAPI, ułatwia obsługę komunikacji, ograniczając się jedynie do grupy podstawowych funkcji. Dla implementacji obsługi interfejsu RS-232 w aplikacji kluczowe były następujące metody:

- Metody inicjalizacji parametrów komunikacji:

```
// Initialize communication parameters
WinComPort1 = new WinComPort(this); // Create new object
WinComPort1->setPortNumber(COM1);
WinComPort1->setBaudRate(BAUD9600);
WinComPort1->setFlowControl(FLOW_NONE);
WinComPort1->setParity(PAR_EVEN);
WinComPort1->setDataBits(DATA_8);
WinComPort1->setStopBits(STOP_2);
```

- Metoda odczytu odebranego znaku:

```
char rxChar;
rxChar = WinComPort1->getChar(void); // Get received char
```

- Metoda transmisji znak po znaku:

```
WinComPort1->putChar(txChar); // Send char
```

4.3.2.2. Obsługa protokołu. Blok ten również związany jest z komunikacją pomiędzy komputerem PC a sterownikiem. Obsługa wymiany danych realizowana jest jednak w wyższej warstwie transmisji, tj. w warstwie aplikacji referencyjnego modelu OSI. W tym celu zaimplementowane zostały metody obsługi zaproponowanego protokołu, omówionego w rozdziale 3.

Kluczową dla realizacji obsługi protokołu w aplikacji, jest metoda:

```
void MainWindow::ExecuteRxFrame(void) { ... }
```

Jej głównym zadaniem jest przetworzenie otrzymanych danych ze zbuforowanej ramki i przekazanie obsługi do odpowiedniej funkcji.

4.3.2.3. Obsługa bazy danych. Framework QT oferuje bardzo bogate wsparcie dla wielu systemów bazodanowych różnych producentów. Należą do nich między innymi: IBM DB2, Borland InterBase, Oracle, PostgreSQL, SQLite, Sybase Adaptive Server oraz wykorzystany w projekcie MySQL. Za obsługę baz danych w bibliotece odpowiada klasa `QtSql`. Obsługa ta odbywa się w obrębie trzech warstw [12]:

1. warstwa sterowników, komunikujących się z silnikami bazy danych,
2. przesyła polecenia w języku SQL oraz odbiera dane,
3. jest interfejsem programistycznym użytkownika. Zawiera szereg metod umożliwiających tworzenie zapytań w języku SQL.

Wszystkie te warstwy współpracują ze sobą dając możliwość szybkiego pisania aplikacji bazodanowych. Aby ułatwić obsługę bazy oraz wyeliminować powtarzanie się kodu utworzono nową klasę `dbconnect()`. Zawiera ona szereg metod często realizowanych zapytań SQL. Przykładowy fragment kodu, odpowiedzialny za odczyt nazwy substancji na podstawie jej „id”, zaprezentowano poniżej:

```
// Get substance name by substance id
QString dbConnect::getSubNameBySubId_db(int sub_id)
{
    QString data_out;
    QSqlQuery my_query;
    // Prepare SQL query
    my_query.prepare(
        "SELECT sub_name FROM substances WHERE sub_id=:sub_id");
    my_query.bindValue(":sub_id",sub_id); // Add parameter to SQL query
    my_query.exec(); // Execute query
    while (my_query.next())
    {
        data_out = my_query.value(0).toString(); // Get result
    }
    return data_out; // Return data from method
}
```

4.3.2.4. Interfejs graficzny. Implementowanie interfejsu graficznego w QT może być realizowane na dwa sposoby. Pierwszy polega na własnoręcznym pisaniu kodu generującego dany element. Należy poddać go odpowiedniej konfiguracji i dopasować do potrzeb wynikających z jego użycia. Metoda ta uważana jest za bardziej optymalną, jednakże wymaga większego nakładu czasu oraz pracy. Innym sposobem projektowania GUI jest użycie dołączonego do pakietu wizualnego edytora. Ze względu na dosyć rozbudowaną hierarchię obiektów graficznych w projekcie, do ich budowy wykorzystano edytora QT Designer.

W pierwszej kolejności wykonano projekty graficzne okien (w tym głównego oraz dialogowych) oraz osadzono w nich obiekty z biblioteki QT. Otrzymano tym samym zbiór plików formularzy (forms) o rozszerzeniu *.ui. W procesie kompilacji całości projektu specjalny preprocesor moc pakietu wygenerował dodatkowe pliki źródłowe *.c. Każdy plik odpowiada danej formatce, aby uzyskać dostęp do jej obiektów, należy dołączyć odpowiadający mu plik nagłówkowy *.h.

Kluczowym dla implementacji obsługi obiektów graficznych w aplikacji jest charakterystyczny dla frameworka mechanizm sygnałów i slotów, gdzie:

- sygnał (ang. signal) – jest metodą klasy, która wygenerowana jest podczas działania programu w chwili, gdy wystąpi jakieś określone zdarzenie. Może to być kliknięcie przycisku, bądź najechanie na jakiś element.
- gniazdo (ang. slot) – stanowi również metodę klasy, która zostanie wywołana wówczas, gdy podłączony do niej sygnał zostanie wyemitowany. [6, 12]

Każda klasa reprezentująca obiekt graficzny w swoim ciele posiada listę charakterystycznych dla siebie sygnałów oraz gniazd. Warunkiem poprawnego działania tego mechanizmu jest połączenie ze sobą nadmienionych dwóch metod. Posłużono się przeznaczoną do tego celu specjalną metodą `connect()` klasy `QObject`. Poza funkcją sprzęgającą możliwe jest przekazywanie w postaci argumentów danych różnych typów. Poniższy przykład prezentuje połączenie ze sobą elementów takich jak `QDial` (pokrętło wyboru wartości o nazwie `setDial`) oraz `QLCDNumber` (wirtualny wyświetlacz LCD nazwany `dispLcd`). Zmiana wartości na pokrętle spowoduje wygenerowanie sygnału, oraz przekazanie wartości typu integer do slotu LCD, powodując tym samym jej wyświetlenie.

```
connect(ui->setDial,SIGNAL(valueChanged(int)),ui->dispLcd,SLOT(display(int)));
```

Rozdział 5

Sprawdzanie systemu i walidacja

5.1. Walidacja pomp

Ważnym aspektem w projektowaniu systemów sterowania, automatyki, czy też elementów procesu jest jakość wykonanego produktu. Zwykle przekłada się ona na poprawność jego działania. Istotnym cechą jest również zgodność z deklarowanymi przez producenta parametrami technicznymi. Ma ona tym większe znaczenie, im bardziej rygorystyczne są wymagania miejsca aplikacji i cel użytkowania urządzenia. Szczególnie restrykcyjnym miejscem funkcjonowania z pewnością są warunki laboratoryjne. Pożądanymi cechami względem urządzeń/systemów biorących udział w badaniach eksperymentalnych są między innymi: stabilna praca, powtarzalność, wysoka dokładność.

W dziedzinie jaką jest miernictwo ta ostatnia cecha ma kluczowe znaczenie. Jako podstawowe pojęcie określające cechę wyników pomiarów, przyrządów lub innych urządzeń, niejednokrotnie stanowi kryterium rozstrzygające akceptację ich użycia [22]. Parametr ten zazwyczaj zawierany jest w dokumentacji technicznej zakupionego sprzętu. Typowy zapis informacji wskazującej na dokładności dla urządzeń pomiarowych cyfrowych to:

$$\pm(\% \text{ wartości zmierzonej} + \text{jednostka rozdzielczości pola}) \quad (1)$$

lub też innych urządzeń jak np. pompy:

$$\pm(\% \text{ wartości określonej w dokumentacji np. pojedynczej dawki}) \quad (2)$$

Podawana dokładność oraz przybliżona charakterystyka obiektów (urządzeń, elementów etc.) mają jedynie charakter postulatu. Zdarza się bowiem, iż uzyskiwane wyniki w znacznym stopniu odbiegają od wartości nominalnych. Okazuje się wówczas, że zachęcająco wyglądające parametry urządzenia nie mają swojego odzwierciedlenia w rzeczywistości. Działaniem pozwalającym rozwiązać owe wątpliwości jest walidacja.

Walidacja to proces, który na drodze badań laboratoryjnych oraz analizy wyników, weryfikuje deklarowane w dokumentacji technicznej informacje [10]. Zakres oraz jej przebieg uzależniony jest w głównej mierze od specyfiki rozpatrywanego problemu. W zależności

od cech, względem których przeprowadza się walidację, dobierane są środki, sprzęt oraz formułuje się procedury [30]. Ostatnim jej etapem jest analiza wyników pomiarowych oraz formułowanie wniosków. Proces walidacji oraz jego jakość silnie uzależnione są od dokładności urządzeń pomiarowych [5].

Zaprojektowany system automatycznego przygotowywania mieszanin jest instalacją, której docelowym miejscem pracy ma być laboratorium Zakładu Pomiarów i Systemów Sterowania. Jako obiekt biorący udział w pracach eksperymentalnych, pożąda się od niego dokładności w otrzymywanych produktach – mieszaninach. Jak kilkakrotnie już nadmieniono, system tworzą warstwy: sprzętowa (w tym elektronika oraz elementy wykonawcze) oraz programowa. Walidacja jego poszczególnych komponentów byłaby procesem niezwykle czasochłonny oraz pracochłonny, możliwe również, że niewykonalnym we wszystkich etapach w dostępnym laboratorium zakładowym. Przy założeniu poprawności działania warstwy sterującej, elementami, które w dużej mierze wpływają na dokładność objętości przygotowywanych mieszanin, są pompy dozujące. Kolejne rozdziały poświęcone zostały procesowi sprawdzania zakupionych pomp miechowych.

5.1.1. Dokumenty normalizujące

Wiele czynności, procesów związanych z projektowaniem, produkcją oraz testowaniem w przemyśle lub laboratoriach objętych jest szeregiem określonych zasad postępowania. Owe zasady grupowane są w normy. Normy to zbiór dokumentów opracowywanych zwykle przez międzynarodowe komitety i organizacje eksperckie jak np. PKN¹ czy ISO². Stanowią one zestawienie pewnego rodzaju przepisów, określających wzorcowe cechy, właściwości oraz metody postępowania. Zawierają również terminologię związaną z daną dziedziną.

Normalizacji podlegają również procesy badawcze, w tym walidacja. W ramach normy dostarczane są zwykle informacje, takie jak: warunki przeprowadzania badania, rodzaj sprzętu pomiarowego, procedury oraz sposoby analizy wyników i ich klasyfikacji. W ramach realizacji projektu dokonano przeglądu norm krajowych oraz europejskich poświęconych tematyce transportu cieczy.

¹ PKN (Polski Komitet Normalizacyjny) – to polska jednostka normalizacyjna. Wchodzi w skład organizacji budżetowych kraju

² ISO (ang. International Organization for Standardization) – jest międzynarodową organizacją zrzeszającą krajowe organizacje normalizacyjne, w tym Polski Komitet Normalizacyjny

TABLICA 5.1. Przegląd norm obejmujących zagadnienia z zakresu urządzeń dozujących.

Oznaczenie normy	Tytuł
PN-EN ISO 8655-5:2003	Tłokowe naczynia do pomiaru objętości – Część 5: Dozowniki
PN-EN ISO 16330:2005	Pompy wyporowe tłokowe i zespoły pompowe – Wymagania techniczne
PN-M-44015:1997	Pompy – Ogólne wymagania i badania

5.1.1.1. PN-EN ISO 8655-5:2003. Spośród wymienionych w Tab. 5.1 dokumentów istotną w odniesieniu do badanych pomp miechowych okazała się Polska Norma PN-EN ISO 8655-5:2003. Jest to norma wprowadzającą europejski jej odpowiednik – ISO 8655-5:2002. W swej treści zawiera podstawowe wymagania metrologiczne oraz maksymalne błędy dopuszczalne wyporowych urządzeń dozujących. Informuje również o sposobie ich użytkowania i znakowania. Zakres dotyczy dozowników o nominalnej objętości dawki od 0,001 ml do 200 ml.

Opisane w wymienionej normie procedury w głównej mierze dotyczą walidacji dozowników wchodzących w skład systemów miareczkujących³ (ang. titrators). W ramach owych procedur istnieje konieczność użycia odpowiednich odczynników o wzorcowym pH oraz urządzeń do pomiaru stężenia. Zrealizowany system dozujący, a w szczególności wykorzystane pompy nie są elementami urządzenia miareczkującego. Nie można tym samym w pełni przyjąć ich jako sposób sprawdzania pomp. Mimo to istotnymi dla przeprowadzonej walidacji okazały się ogólne informacje dotyczące warunków metrologicznych oraz wartości maksymalnych błędów zawartych w przytoczonej normie.

5.1.2. Procedury pomiarowe

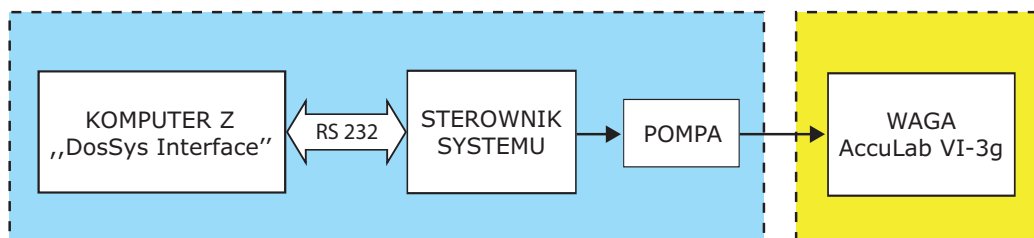
W procesie walidacji niezwykle istotnym etapem jest określenie metrologicznej procedury postępowania. Jak już nadmieniono, wskazane przez normę PN-EN ISO 8655-5:2003 metody nie mogły zostać przyjęte na potrzeby badań. Zaistniała tym samym konieczność określenia własnej procedury. W porozumieniu z promotorem zaproponowano metodę metrologiczną przeprowadzenia procesu walidacji.

Głównym celem przeprowadzonego sprawdzania pomp była weryfikacja deklarowanej przez wytwórcę dokładności objętości cieczy transportowanej przez zakupione pompy.

³ miareczkowanie – chemiczna technika analizy ilościowej polegająca na dodawaniu roztworu – tzw. titranta z biurety w postaci kropeł do roztworu zwanego analitem.

Zawarta w dokumentacji pompy [13] informacja o dokładności podana została zgodnie z zapisem (2). Oznacza to, iż deklarowany procentowy błąd wartości pojedynczego wstrzyknięcia o objętości 1,8 ml ma stanowić nie więcej niż $\pm 0,75\%$. Warunki przeprowadzania walidacji przyjęto z normy [31]. Należą do nich:

- Przedział objętości pojedynczej dawki od 0,001 ml do 200 ml.
- Przedział temperaturowy pomieszczenia laboratoryjnego od 15°C do 30°C.
- Maksymalny błąd procentowy dla serii wstrzyknięć – $\pm 0,8\%$.
- Jako medium testowe – woda filtrowana o 3. stopniu czystości.



RYSUNEK 5.1. Schemat toru pomiarowego realizowanej procedury.

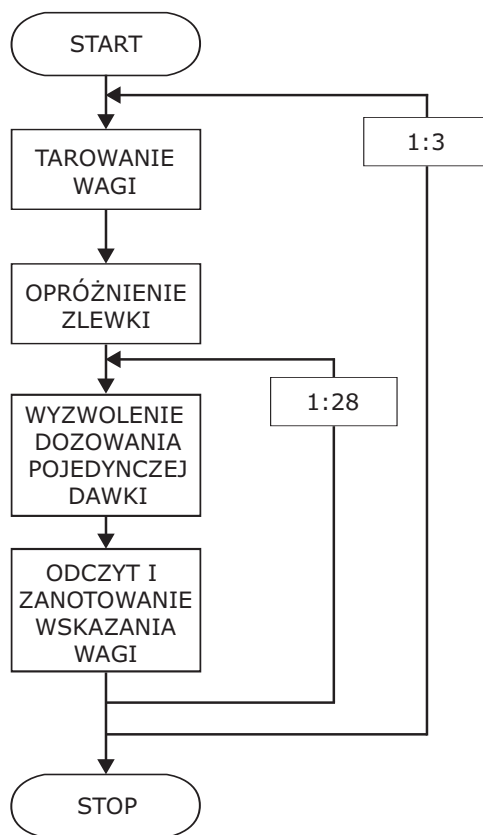
5.1.2.1. Metoda masowa – pośrednia. Zaproponowaną procedurą, według której odbyło się sprawdzanie pomp jest metoda masowa. Przy pomocy specjalistycznej wagi laboratoryjnej AccuLab VI-3mg o błędzie $\pm 0,004$ g na odczyt dokonywano pomiaru masy kolejnych wstrzyknięć pompy. Schemat toru pomiarowego umieszczono na Rys. 5.1. Procedurę dla obu pomp powtórzono 3 razy, dochodząc każdorazowo do objętości $28 \cdot 1,8$ ml, co daje 50,4 ml. Dokładny przebieg procedury prezentuje diagram na Rys. 5.2. Jako że otrzymywane wyniki podane są w jednostkach miary masy – gramach, a procedura jest metodą pośrednią pomiaru, koniecznym było ich odwzorowanie na jednostki miary objętości – ml. Przeliczenie przeprowadzono przy pomocy zależności (3) [21]:

$$\rho = \frac{m}{V} \implies V = \frac{m}{\rho} \quad (3)$$

gdzie ρ – gęstość substancji, m – masa substancji, V – objętość substancji.

W rachunkach uwzględniono gęstość wody która wyniosła $\rho = 997,0479 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ [21] w temperaturze 25°C.

Uzyskane wyniki po przeprowadzeniu badania zgodnie z powyższą procedurą zamieszczone zostały w załączniku 7.1 (pompa A i pompa B).



RYSUNEK 5.2. Diagram procedury walidacji metodą masową dla pojedynczej pompy.

5.2. Analiza danych pomiarowych

Z przeprowadzonych na dwóch pompach doświadczeń uzyskano sześć serii danych liczbowych, po 3 serie na urządzenie. Otrzymane liczby są surowymi wynikami pomiaru [22]. Aby móc uzyskać wnioski z procesu walidacji, dane te należy podać analizie względem ich poprawności i wiarygodności. Typowymi procedurami w metrologii są analiza błędów i szacowanie niepewności.

5.2.1. Błędy pomiaru

Błędem Δx_i pomiaru x_i nazywamy różnicę pomiędzy pojedynczym wynikiem pomiaru x_i a wartością poprawną X [19].

Błąd bezwzględny pomiaru:

$$\Delta x_i = |x_i - X| \quad (4)$$

gdzie X – wartość poprawna, x_i – wynik pomiaru.

Może być również wyrażony w postaci bezwymiarowej jako błąd względny:

$$\delta = \frac{\Delta x_i}{|X|} \quad (5)$$

5.2.2. Szacowanie niepewności

Błąd w postaci (4) oraz (5) jest wielkością charakteryzującą pojedynczy punkt pomiarowy. Kolejny pomiar tej samej wielkości mierzonej da inną wartość. W związku z czym wartość błędu Δx_i w odniesieniu do czasu i miejsca wystąpienia ma charakter losowy. Reprezentacja wyników w postaci błędów nie niesie ze sobą globalnej konstruktywnej informacji na temat metody pomiarowej. Zdecydowanie bardziej pożądaną informacją w prowadzonym eksperymencie jest niepewność pomiaru. Charakteryzuje ona rozrzut wyników który, może być przypisany do wartości mierzonej.

Niepewność standardową złożoną u_C wyraża się za pomocą zależności która stanowi pierwiastek sumy kwadratów niepewności u_A oraz u_B :

$$u_C = \sqrt{(u_A)^2 + (u_B)^2} \quad (6)$$

Niepewność cząstkową szacowaną metodą typu A wyznacza się, gdy dla stałych warunków pomiarowych, na podstawie niezależnych obserwacji, uzyskujemy serię danych. Najlepszym estymatorem niepewności „typu A” jest odchylenie standardowe średniej pomiaru [4]:

$$u_A = \bar{\sigma}(x_i) \quad (7)$$

gdzie odchylenie standardowe średniej $\bar{\sigma}$ wyrażone jest zależnością :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n - 1) \cdot n}} \quad (8)$$

gdzie n – liczba pomiarów, x_i – i -ty pomiar, $\bar{x}$ – wartość średnia serii pomiarów.

Niepewność cząstkowa szacowana metodą typu B koncentruje się na obserwacji układu pomiarowego. Do jej poprawnego oszacowania potrzebna jest wiedza na temat wielkości wpływających danego urządzenia lub toru. Szacowaną niepewność u_B wyznaczono za pomocą zależności:

$$u_B = \frac{\Delta_{gr}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

gdzie Δ_{gr} – błąd graniczny przyrządu pomiarowego.

Przyjęto rozkład prostokątny, jako możliwie najgorszy przypadek, gdyż nie było przesłanek do innego wyboru. Błąd graniczny wagi AccuLab VI-3g, zgodnie z dokumentacją producenta [1] wynosi $\Delta_{gr} = 0,004$ g.

5.2.3. Wynik walidacji pompy A

Wartości błędów dla każdego z punktów pomiaru znajdują się w załączniku 7.1, natomiast wartości średnie błędu bezwzględnego oraz względnego dla każdej z serii zaprezentowano w Tab. 5.2. Oszacowane wartości niepewności standardowych oraz odchyłeń cząstkowych umieszczono w Tab. 5.3

TABLICA 5.2. Średnie wartości błędów dla pompy A.

Błąd	Seria I	Seria II	Seria III
Średnia wartość błędu bezwzględnego w ml	0,117	0,102	0,106
Średnia wartość błędu względnego	0,065	0,056	0,059

TABLICA 5.3. Wyniki szacowania niepewności dla pompy A.

Niepewności	Seria I	Seria II	Seria III
Cząstkowa szacowana metodą typu A	0,000060	0,000048	0,000044
Cząstkowa szacowana metodą typu B	0,002309	0,002309	0,002309
Standardowa złożona	0,002310	0,002310	0,002310

5.2.4. Wynik walidacji pompy B

Podobnie jak dla badanej pompy A, wyniki obliczonych błędów dla wszystkich punktów umieszczono w załączniku 7.1. Średnie ich wartości zawiera Tab. 5.4. Niepewności standardowe oraz niepewności cząstkowe dla danych otrzymanych po przebadaniu pompy B, zaprezentowano w Tab. 5.5.

TABLICA 5.4. Średnie wartości błędów dla pompy B.

Błąd	Seria I	Seria II	Seria III
Średnia wartość błędu bezwzględnego w ml	0,180	0,181	0,183
Średnia wartość błędu względnego	0,100	0,100	0,101

TABLICA 5.5. Wyniki szacowania niepewności dla pompy B.

Niepewności	Seria I	Seria II	Seria III
Cząstkowa szacowana metodą typu A	0,000044	0,000064	0,000030
Cząstkowa szacowana metodą typu B	0,002309	0,002309	0,002309
Standardowa złożona	0,002310	0,002310	0,002310

5.3. Wnioski

Na podstawie analizy powyższych wyników pomiarów, obliczonych błędów oraz oszacowanych niepewności, zaproponowano następujące wnioski:

- Obliczone wartości średnie błędów we wszystkich seriach dla obydwu pomp wskazują, iż deklarowane przez producenta dotyczące dokładności dalece odbiegają od rzeczywistych wyników ich pracy. Maksymalny błąd dla mieszka o objętości 1,8 ml powinien być mniejszy niż 0,75% tej wartości, co daje 1,0135 ml. Najmniejszą wartość błędu uzyskano dla pompy A w II serii, wynosi on 0,102 ml czyli 5,66% pojedynczej dawki.
- Istotny wpływ na wyniki analizy mogło mieć oddziaływanie temperatury na urządzenie dozujące. Zakupione pompy wykonane są głównie w elementów plastikowych, w tym wał i korbowód. Wraz ze zmianą temperatury mogła zmienić się twardość materiału, wpływając tym samym na charakterystykę pracy pomp. Innym negatywnie działającym czynnikiem może być również niezbyt precyzyjne wykonanie pomp.

Rozdział 6

Wnioski z pracy

6.1. Podsumowanie

Wynikiem praktycznym niniejszej pracy jest uruchomiony system automatycznego przygotowywania mieszanin cieczy. Realizacja projektu przebiegała zgodnie z wyznaczonym planem, zawierając tym samym wyznaczone cele i wymagania.

Istotnym na etapie planowania projektu był podsumowany w początkowej części pracy przegląd dostępnych rozwiązań. Okazało się iż nie są one zbyt zróżnicowane. Zwykle ich struktura oraz podstawowe elementy stanowią pewnie standardy wyposażenia. Analiza tychże urządzeń pod względem budowy pozwoliła zdefiniować podstawowe cele i potrzeby projektowe. Konsultacje z przyszłymi użytkownikami systemu umożliwiły sformułowanie wymagań względem funkcjonalności. Informacje te zawarto w rozdziale 2 pracy.

Realizacja budowy systemu odbywała się w podziale na trzy główne etapy. Pierwsza faza polegała na skompletowaniu i uruchomieniu warstwy sprzętowej. W tym celu dokonano zakupu miechowych pomp dozujących oraz potrzebnych podzespołów elektronicznych. W kolejnym kroku zaprojektowano i wykonano obwody drukowane sterownika. Fazą kończącą pierwszy etap było napisanie oprogramowania mikrokontrolera ATMega16. Poza podstawowymi funkcjami obsługi wejść/wyjść, kluczowym dla projektu była implementacja komunikacji szeregowej w oparciu o dedykowany protokół. Ostatnim stadium planu wykonawstwa to etap typowo programowy. Wzorem systemów komercyjnych powstała aplikacja o charakterze interfejsu operatora. Prócz funkcji sterowania nadrzędnego, program pozwala na projektowanie mieszanin oraz zapis danych do systemu bazy MySQL. Opis oraz podsumowanie tej części zawarto w rozdziałach 4 oraz 5.

W celu sprawdzenia zrealizowane projektu oraz jego oceny podjęto się walidacji pomp dozujących. W pierwszej fazie dokonano przeglądu literatury oraz dokumentów normalizacyjnych systemów/urządzeń dozujących. W następnym kroku, na podstawie zaproponowanej procedury pomiarowej, przeprowadzono eksperyment na obydwu pompach. Na tym

etapie kluczowym było poprawne działanie nie tylko samych dozowników, ale i pozostałych elementów systemu. Jak nadmieniono w rozdziale 6 pracy wyniki sprawdzania, a w szczególności analiza błędów pomp, dały wyniki dalece odbiegające od tych deklarowanych przez wytwórcę.

Szereg czynności wchodzących w skład poszczególnych etapów realizacji pracy dały możliwość zaznajomienia się z nowymi technologiami, w tym programowanie graficznych aplikacji bazodanowych z wykorzystaniem frameworku QT 4. Poszerzono również wiadomości z zakresu projektowania systemów mikroprocesorowych. Ostaną część pracy – przeprowadzona walidacja – pozwoliła ugruntować nabytą w trakcie studiów wiedzę oraz umiejętności z zakresu przeprowadzania procedur pomiarowych oraz analizy ich wyników.

6.2. Propozycja dalszego rozwoju

Wykonany projekt stanowi prototyp systemu dozowania i przygotowywania mieszanin, w związku z czym z pewnością nie jest idealny produktem wolnym od wad. Może jednak stanowić podstawę do dalszego jego rozwoju. Kierunkiem, jaki warto by rozważyć w ewolucji urządzenia jest, wzorem produktów firmy Metrohm AG, większa modularyzacja dająca lepszą skalowalność systemu. Takie elastyczne rozwiązanie można niewątpliwie osiągnąć wprowadzając w warstwie najniższej sterowania komunikację z wykorzystaniem magistrali np. CAN. Wówczas każde z urządzeń dozujących – pomp stanowiłoby autonomiczną, zmikroprocesorowaną jednostkę, komunikującą się ze sterownikiem systemu. Za rozwiązanie układowe realizacji takiego scenariusza, można przyjąć dostępne w ofercie Microchip mikrokontrolery PIC. Łączą one w sobie typowe cechy urządzeń klasy AT-Mega16 oraz bogate rozwiązania w dziedzinie komunikacji, w tym wbudowaną obsługę nadmienionej magistrali CAN.

Innym kierunkiem zmian wartym przemyślenia jest poszerzenie funkcji i możliwości oprogramowani PC. Powstała aplikacja „*Dosing System Interface 1.0*” uruchamiana jest na stanowisku roboczym. W związku z czym aby, przygotować projekt mieszanin należy skorzystać z tego konkretnego komputera. Wprowadzenie modyfikacji w postaci dodatkowego interfejsu w postaci strony www w znacznym stopniu zwiększyłoby dostępność

całego systemu. Wówczas stanowisko pełniłoby dodatkową funkcję serwera. Wymiana danych pomiędzy główną aplikacją a interfejsem internetowym realizowana może być poprzez obecnie działającą bazę danych.

Z punktu widzenia wyników przeprowadzonych badań warto również rozważyć przy ewentualnym zakupie dodatkowych pomp ofertę innych producentów. Niestety pod tym względem, o czym się przekonano, polski rynek przedstawicieli firm produkujących dozowniki nie jest zbyt zasobny. Możliwe, że dobrym rozwiązaniem byłoby przyjąć strategię poszukiwania tychże urządzeń za granicami kraju.

Rozdział 7

Załączniki

7.1. Wyniki walidacji pomp

SERIA I		POJEDYNCZE WSTRZYKNIĘCIE: 1.8 ml						Temp: 25 st. C	
Nr pomiaru	Wart. nom. [ml]	Wsk. wagi [g]	Obj. V [ml]	Błąd bezwzgl. Poj.	Wstrzyk. Obj. Poj.	Wstrzyk. [ml]	$(x_i - \bar{x})^2$	Błąd wzgl. Poj.	Wstrzyk.
1	1.8	1.571	1.576	0.224	1.576	0.0112			0.124
2	3.6	3.205	3.214	0.161	1.639	0.0019			0.090
3	5.4	4.915	4.930	0.085	1.715	0.0011			0.047
4	7.2	6.628	6.648	0.082	1.718	0.0013			0.046
5	9	8.252	8.276	0.171	1.629	0.0028			0.095
6	10.8	9.918	9.947	0.129	1.671	0.0001			0.072
7	12.6	11.593	11.627	0.120	1.680	0.0000			0.067
8	14.4	13.331	13.370	0.057	1.743	0.0037			0.032
9	16.2	15.010	15.054	0.116	1.684	0.0000			0.064
10	18	16.729	16.779	0.076	1.724	0.0018			0.042
11	19.8	18.373	18.427	0.151	1.649	0.0011			0.084
12	21.6	20.092	20.151	0.076	1.724	0.0018			0.042
13	23.4	21.777	21.841	0.110	1.690	0.0001			0.061
14	25.2	23.488	23.558	0.084	1.716	0.0012			0.047
15	27	25.170	25.245	0.113	1.687	0.0000			0.063
16	28.8	26.794	26.873	0.171	1.629	0.0028			0.095
17	30.6	28.537	28.622	0.052	1.748	0.0044			0.029
18	32.4	30.183	30.272	0.149	1.651	0.0010			0.083
19	34.2	31.893	31.987	0.085	1.715	0.0011			0.047
20	36	33.612	33.712	0.076	1.724	0.0018			0.042
21	37.8	35.264	35.368	0.143	1.657	0.0006			0.080
22	39.6	36.857	36.966	0.202	1.598	0.0071			0.112
23	41.4	38.587	38.701	0.065	1.735	0.0028			0.036
24	43.2	40.273	40.392	0.109	1.691	0.0001			0.061
25	45	41.940	42.064	0.128	1.672	0.0001			0.071
26	46.8	43.605	43.734	0.130	1.670	0.0001			0.072
27	48.6	45.353	45.487	0.047	1.753	0.0051			0.026
28	50.4	46.976	47.115	0.172	1.628	0.0029			0.096
Średnia wart:		1.6827	Ua			0.000060			
Odchyl. stand.		0.000319	Ub			0.002309			
Śr. błąd bezwzgl.		0.117305							
Śr. błąd. wzgl.		0.06517	Uc			0.002310			

RYSUNEK 7.1. Wyniki pierwszej serii dla pompy A.

SERIA II POJEDYNCZE WSTRZYKNIĘCIE: 1.8 ml										Temp:	25 st. C
Nr pomiaru	Wart. nom. [ml]	Wsk. wagi [g]	Obj.V [ml]	Błąd bezwzgl. Poj.	Wstrzyk Obj. Poj.	Wstrzyk [ml]	(xi - xsr)^2	Błąd wzgl. Poj.	Wstrzyk		
1	1.8	1.683	1.688	0.112	1.688	0.0000		0.062			
2	3.6	3.321	3.331	0.157	1.643	0.0025		0.087			
3	5.4	5.007	5.022	0.109	1.691	0.0000		0.061			
4	7.2	6.753	6.773	0.049	1.751	0.0034		0.027			
5	9	8.433	8.458	0.115	1.685	0.0001		0.064			
6	10.8	10.131	10.161	0.097	1.703	0.0001		0.054			
7	12.6	11.799	11.834	0.127	1.673	0.0004		0.071			
8	14.4	13.505	13.545	0.089	1.711	0.0003		0.049			
9	16.2	15.151	15.196	0.149	1.651	0.0018		0.083			
10	18	16.869	16.919	0.077	1.723	0.0009		0.043			
11	19.8	18.567	18.622	0.097	1.703	0.0001		0.054			
12	21.6	20.302	20.362	0.060	1.740	0.0022		0.033			
13	23.4	21.928	21.993	0.169	1.631	0.0039		0.094			
14	25.2	23.639	23.709	0.084	1.716	0.0005		0.047			
15	27	25.331	25.406	0.103	1.697	0.0000		0.057			
16	28.8	27.056	27.136	0.070	1.730	0.0014		0.039			
17	30.6	28.696	28.781	0.155	1.645	0.0023		0.086			
18	32.4	30.439	30.529	0.052	1.748	0.0030		0.029			
19	34.2	32.104	32.199	0.130	1.670	0.0005		0.072			
20	36	33.825	33.925	0.074	1.726	0.0011		0.041			
21	37.8	35.452	35.557	0.168	1.632	0.0037		0.093			
22	39.6	37.158	37.268	0.089	1.711	0.0003		0.049			
23	41.4	38.874	38.989	0.079	1.721	0.0008		0.044			
24	43.2	40.528	40.648	0.141	1.659	0.0012		0.078			
25	45	42.232	42.357	0.091	1.709	0.0003		0.051			
26	46.8	43.914	44.044	0.113	1.687	0.0000		0.063			
27	48.6	45.666	45.801	0.043	1.757	0.0041		0.024			
28	50.4	47.389	47.529	0.072	1.728	0.0012		0.040			
Średnia wart:						1.6975	Ua		0.000048		
Odchyl. stand.						0.000252	Ub		0.002309		
Śr. błąd bezwzgl.						0.102523					
Śr. błąd wzgl.						0.056957	Uc		0.002310		

RYSUNEK 7.2. Wyniki drugiej serii dla pompy A.

SERIA III POJEDYNCZE WSTRZYKNIĘCIE: 1.8 ml										Temp:	25 st. C
Nr pomiaru	Wart. nom. [ml]	Wsk. wagi [g]	Obj.V [ml]	Błąd bezwzgl. Poj.	Wstrzyk Obj. Poj.	Wstrzyk [ml]	(xi - xsr)^2	Błąd wzgl. Poj.	Wstrzyk		
1	1.8	1.655	1.660	0.140	1.660	0.0011		0.078			
2	3.6	3.315	3.325	0.135	1.665	0.0008		0.075			
3	5.4	4.999	5.014	0.111	1.689	0.0000		0.062			
4	7.2	6.698	6.718	0.096	1.704	0.0001		0.053			
5	9	8.377	8.402	0.116	1.684	0.0001		0.064			
6	10.8	10.121	10.151	0.051	1.749	0.0032		0.028			
7	12.6	11.788	11.823	0.128	1.672	0.0004		0.071			
8	14.4	13.504	13.544	0.079	1.721	0.0008		0.044			
9	16.2	15.133	15.178	0.166	1.634	0.0035		0.092			
10	18	16.875	16.925	0.053	1.747	0.0029		0.029			
11	19.8	18.577	18.632	0.093	1.707	0.0002		0.052			
12	21.6	20.228	20.288	0.144	1.656	0.0014		0.080			
13	23.4	21.95	22.015	0.073	1.727	0.0012		0.041			
14	25.2	23.643	23.713	0.102	1.698	0.0000		0.057			
15	27	25.271	25.346	0.167	1.633	0.0036		0.093			
16	28.8	27.001	27.081	0.065	1.735	0.0018		0.036			
17	30.6	28.701	28.786	0.095	1.705	0.0001		0.053			
18	32.4	30.343	30.433	0.153	1.647	0.0021		0.085			
19	34.2	32.027	32.122	0.111	1.689	0.0000		0.062			
20	36	33.768	33.868	0.054	1.746	0.0028		0.030			
21	37.8	35.456	35.561	0.107	1.693	0.0000		0.059			
22	39.6	37.147	37.257	0.104	1.696	0.0000		0.058			
23	41.4	38.817	38.932	0.125	1.675	0.0003		0.069			
24	43.2	40.481	40.601	0.131	1.669	0.0006		0.073			
25	45	42.194	42.319	0.082	1.718	0.0006		0.046			
26	46.8	43.846	43.976	0.143	1.657	0.0013		0.080			
27	48.6	45.578	45.713	0.063	1.737	0.0019		0.035			
28	50.4	47.276	47.416	0.097	1.703	0.0001		0.054			
Średnia wart:						1.6934	Ua		0.000044		
Odchyl. stand.						0.000233	Ub		0.002309		
Śr. błąd bezwzgl.						0.106568					
Śr. błąd wzgl.						0.059204	Uc		0.002310		

RYSUNEK 7.3. Wyniki trzeciej serii dla pompy A.

SERIA I				POJEDYNCZE WSTRZYKNIĘCIE: 1.8 ml		Temp: 25 st. C		
Nr pomiaru	Wart. nom. [ml]	Wsk. wagi [g]	Obj.V [ml]	Błąd bezwzgl. Poj.	Wstrzyk Obj. Poj.	Wstrzyk.[ml] (xi - xsr)^2	Błąd wzgl. Poj.	Wstrzyk
1	1.8	1.611	1.616	0.184	1.616	0.0000	0.102349444	
2	3.6	3.223	3.233	0.183	1.617	0.0000	0.101792487	
3	5.4	4.821	4.835	0.197	1.603	0.0003	0.109593296	
4	7.2	6.398	6.417	0.218	1.582	0.0014	0.121294511	
5	9	8.020	8.044	0.173	1.627	0.0001	0.09622048	
6	10.8	9.632	9.661	0.183	1.617	0.0000	0.101792487	
7	12.6	11.229	11.262	0.198	1.602	0.0003	0.110150497	
8	14.4	12.921	12.959	0.103	1.697	0.0061	0.057216432	
9	16.2	14.523	14.566	0.193	1.607	0.0002	0.107364494	
10	18	16.090	16.138	0.228	1.572	0.0022	0.126866518	
11	19.8	17.759	17.812	0.126	1.674	0.0030	0.070032047	
12	21.6	19.327	19.384	0.227	1.573	0.0021	0.126309317	
13	23.4	21.009	21.071	0.113	1.687	0.0046	0.062788438	
14	25.2	22.607	22.674	0.197	1.603	0.0003	0.109593296	
15	27	24.212	24.284	0.190	1.610	0.0001	0.105692892	
16	28.8	25.799	25.875	0.208	1.592	0.0007	0.115722504	
17	30.6	27.412	27.493	0.182	1.618	0.0000	0.101235286	
18	32.4	29.085	29.171	0.122	1.678	0.0035	0.067803245	
19	34.2	30.688	30.779	0.192	1.608	0.0001	0.106807293	
20	36	32.312	32.408	0.171	1.629	0.0001	0.095106078	
21	37.8	33.927	34.027	0.180	1.620	0.0000	0.100120885	
22	39.6	35.492	35.597	0.230	1.570	0.0024	0.127980919	
23	41.4	37.124	37.234	0.163	1.637	0.0003	0.090648473	
24	43.2	38.772	38.887	0.147	1.653	0.0011	0.081733262	
25	45	40.349	40.468	0.218	1.582	0.0014	0.121294511	
26	46.8	41.947	42.071	0.197	1.603	0.0003	0.109593296	
27	48.6	43.585	43.714	0.157	1.643	0.0006	0.087305269	
28	50.4	45.199	45.333	0.181	1.619	0.0000	0.100678085	
Średnia wart:					1.6190	Ua	0.000044	
Odchyl. stand.					0.000234	Ub	0.002309	
Śr. błąd bezwzgl.					0.18097			
Śr. błąd wzgl.					0.100539	Uc	0.002310	

RYSUNEK 7.4. Wyniki pierwszej serii dla pompy B.

SERIA II										Temp: 25 st. C	
Nr pomiaru	Wart. nom. [ml]	Wsk. wagi [g]	Obj.V [ml]	Błąd bezwzgl. Poj.	Wstrzyk Obj. Poj.	Wstrzyk [ml]	(xi - xsr)^2	Błąd wzgl. Poj.	Wstrzyk		
1	1.8	1.605	1.609753	0.184		1.616	0.0000		0.102349444		
2	3.6	3.193	3.202455	0.207		1.593	0.0006		0.115165303		
3	5.4	4.789	4.803181	0.199		1.601	0.0003		0.110707698		
4	7.2	6.412	6.430987	0.172		1.628	0.0001		0.095663279		
5	9	8.009	8.032717	0.198		1.602	0.0003		0.110150497		
6	10.8	10	9.69362	0.139		1.661	0.0018		0.077275656		
7	12.6	11.292	11.32544	0.168		1.632	0.0002		0.093434476		
8	14.4	12.866	12.9041	0.221		1.579	0.0015		0.122966113		
9	16.2	14.485	14.52789	0.176		1.624	0.0000		0.097892082		
10	18	16.147	16.19482	0.133		1.667	0.0024		0.073932452		
11	19.8	17.889	17.94197	0.053		1.747	0.0167		0.029356397		
12	21.6	19.372	19.42937	0.313		1.487	0.0171		0.173671376		
13	23.4	20.935	20.99699	0.232		1.568	0.0025		0.129095321		
14	25.2	22.574	22.64085	0.156		1.644	0.0007		0.086748068		
15	27	24.164	24.23556	0.205		1.595	0.0005		0.114050902		
16	28.8	25.805	25.88141	0.154		1.646	0.0008		0.085633667		
17	30.6	27.392	27.47311	0.208		1.592	0.0007		0.115722504		
18	32.4	29.036	29.12198	0.151		1.649	0.0010		0.083962065		
19	34.2	30.606	30.69663	0.225		1.575	0.0019		0.125194916		
20	36	32.284	32.3796	0.117		1.683	0.0042		0.065017241		
21	37.8	33.897	33.99738	0.182		1.618	0.0000		0.101235286		
22	39.6	35.462	35.56701	0.230		1.570	0.0023		0.127980919		
23	41.4	37.133	37.24296	0.124		1.676	0.0034		0.068917646		
24	43.2	38.709	38.82363	0.219		1.581	0.0014		0.121851712		
25	45	40.291	40.41031	0.213		1.587	0.0010		0.118508507		
26	46.8	41.968	42.09228	0.118		1.682	0.0041		0.065574442		
27	48.6	43.581	43.71005	0.182		1.618	0.0000		0.101235286		
28	50.4	45.177	45.31078	0.199		1.601	0.0003		0.110707698		
Średnia wart:						1.6185	Ua		0.000064		
Odchyl. stand.						0.000339	Ub		0.002309		
Śr. błąd bezwzgl.						0.181543					
Śr. błąd wzgl.						0.100857	Uc		0.002310		

RYSUNEK 7.5. Wyniki drugiej serii dla pompy B.

SERIA III										Temp: 25 st. C	
Nr pomiaru	Wart. nom. [ml]	Wsk. wagi [g]	Obj.V [ml]	Błąd bezwzgl. Poj.	Wstrzyk Obj. Poj.	Wstrzyk [ml]	(xi - xsr)^2	Błąd wzgl. Poj.	Wstrzyk		
1	1.8	1.581	1.585682	0.184		1.616	0.0000		0.102349444		
2	3.6	3.192	3.201452	0.184		1.616	0.0000		0.102349687		
3	5.4	4.831	4.845306	0.156		1.644	0.0007		0.086748068		
4	7.2	6.437	6.456062	0.189		1.611	0.0001		0.105135691		
5	9	8.066	8.089885	0.166		1.634	0.0003		0.092320075		
6	10.8	9.675	9.70365	0.186		1.614	0.0000		0.103464089		
7	12.6	11.301	11.33447	0.169		1.631	0.0002		0.093991677		
8	14.4	12.862	12.90009	0.234		1.566	0.0027		0.130209722		
9	16.2	14.526	14.56902	0.131		1.669	0.0026		0.072818051		
10	18	16.135	16.18278	0.186		1.614	0.0000		0.103464089		
11	19.8	17.72	17.77247	0.210		1.590	0.0008		0.116836905		
12	21.6	19.346	19.40329	0.169		1.631	0.0002		0.093991677		
13	23.4	20.969	21.03109	0.172		1.628	0.0001		0.095663279		
14	25.2	22.591	22.6579	0.173		1.627	0.0001		0.09622048		
15	27	24.179	24.2506	0.207		1.593	0.0006		0.115165303		
16	28.8	25.79	25.86637	0.184		1.616	0.0000		0.102349687		
17	30.6	27.44	27.52126	0.145		1.655	0.0014		0.080618861		
18	32.4	29.047	29.13302	0.188		1.612	0.0000		0.10457849		
19	34.2	30.669	30.75982	0.173		1.627	0.0001		0.09622048		
20	36	32.258	32.35352	0.206		1.594	0.0006		0.114608103		
21	37.8	33.848	33.94823	0.205		1.595	0.0005		0.114050902		
22	39.6	35.485	35.59008	0.158		1.642	0.0006		0.087862469		
23	41.4	37.097	37.20685	0.183		1.617	0.0000		0.101792487		
24	43.2	38.702	38.81661	0.190		1.610	0.0001		0.105692892		
25	45	40.284	40.40329	0.213		1.587	0.0010		0.118508507		
26	46.8	41.867	41.99098	0.212		1.588	0.0009		0.117951307		
27	48.6	43.502	43.63082	0.160		1.640	0.0005		0.088976871		
28	50.4	45.103	45.23656	0.194		1.606	0.0002		0.107921694		
Średnia wart:						1.6167	Ua		0.000030		
Odchyl. stand.						0.000157	Ub		0.002309		
Śr. błąd bezwzgl.						0.183334					
Śr. błąd wzgl.						0.101852	Uc		0.002310		

RYSUNEK 7.6. Wyniki trzeciej serii dla pompy B.

Bibliografia

- [1] AccuLab Sartorius Group. *AccuLab VI-3mg Manual*, 2004.
- [2] Atmel Corporation, 2325 Orchard Parkway; San Jose, USA. *8-bit Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash Manual*, 2009.
- [3] G. A. Baciński. Pompy dozujące w przemyśle chemicznym. *Rynek Chemiczny*, 1(1/2006):18–20, 2006.
- [4] BIMP (Bureau International des Poids et Mesures). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*.
- [5] BIMP (Bureau International des Poids et Mesures). *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*.
- [6] J. Blanchette, M. Summerfield. *C++ GUI Programming with Qt 4*. Prentice Hall, wydanie 1, 2008.
- [7] S. Cabral, K. Murphy. *MySQL Administrator's Bible*. Wiley Publishing, Inc, Indianapolis, wydanie 3, 2009.
- [8] A. Chochowski. *Elektrotechnika z automatyką*. WSiP Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, wydanie 2, 1998.
- [9] C. Churcher. *Beginning Database Design*. Apress, New York, wydanie 1, 2007.
- [10] CITAC/Eurachem. *Guide to Quality in Analytical Chemistry. An Aid to Accreditation*.
- [11] J. Doliński. *Mikrokontrolery AVR w praktyce*. BTC, Warszawa, wydanie 1, 2003.
- [12] J. Ganczarski, M. Owczarek. *C++. Wykorzystaj potęgę aplikacji graficznych*. Helion, Gliwice, wydanie 1, 2008.
- [13] GORMAN-RUPP Industries, 44813 Ohio; Bellville, USA. *Service Data Sheet*, 2002.
- [14] P. Hadam. *Projektowanie systemów mikroprocesorowych*. BTC, Warszawa, wydanie 1, 2004.
- [15] Hirschmann Laborgerate. *Opus dispenser Manual*, 2010.
- [16] Hongfa Relay. *JGC-4f Solid State Relay Manual*, 2010.
- [17] I. Horton. *Od podstaw Visual C++ 2005*. Helion, Gliwice, wydanie 1, 2008.
- [18] I. Karassik, J. Messina, C. Heald. *Pump Handbook*. McGRAW-HILL, New York, wydanie 3, 2001.
- [19] A. Kozyra, A. Wiora, J. Wiora. *Szacowanie niepewności w pomiarach potencjometrycznych*. PAN, PKJS, Katowice, wydanie 1, 2007.
- [20] K.Stebel. *Materiały do ćw. laboratoryjnych UA; Komputerowe sterowanie pompami dozującymi*. Politechnika Śląska, Instytut Automatyki, Zakład Urządzeń i Układów Automatyki.
- [21] D. Lide. *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC-Taylor and Francis Group LLC, wydanie 87, 2007.
- [22] A. Marcyniuk. *Podstawy miernictwa elektrycznego dla kierunku elektronika*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, wydanie 1, 2000.

- [23] G. McMillan, D. Considine. *Process/industrial instruments and controls handbook*. McGRAW-HILL, wydanie 5, 1999.
- [24] Metrohm AG. *Synthesis Controller for the Life Sciences Brochure*, 2010.
- [25] Mitsubishi Materials C.M.I. *Product Information of Motor; Synchronous Motor; M8*.
- [26] T. Noergaard. *Embedded Systems Architecture, A Comprehensive Guide for Engineers and Programmers*. Elsevier, wydanie 1, 2005.
- [27] T. Ochocki, B. Szydłowski. Technika przekaźnikowa - podstawowe informacje techniczne - cz. II. *Napędy i Sterowanie*, 11(127):72–73, 2009.
- [28] OMEGA Engineering, INC. *Solid State Relay (lec 33) – materiały szkoleniowe*, 2009.
- [29] D. Pilone, R. Miles. *Head First Software Development*. O' Reilly, wydanie 1, 2008.
- [30] J. Piotrowski, K. Kostyrko. *Wzorcowanie aparatury pomiarowej*. Helion, Warszawa, wydanie 1, 2000.
- [31] Polski Komitet Normalizacyjny. *PN-EN ISO 8655-5:2003. Polska Norma wprowadzająca. Tłokowe naczynia do pomiaru objętości – Część 5: Dozowniki*, 2003.
- [32] J. Przepiórkowski. Silniki elektryczne w praktyce elektronika, część 5 Silniki prądu zmiennego. *Elektronika Praktyczna*, 4(4/2004):87–90, 2006.
- [33] PZ HTL S.A. *SWIFTPET+ Manual*, 2010.
- [34] QMX Laboratories. *ProLiquid DuoDispenser Manual*, 2010.
- [35] Siemens AG. *Small Relay D2 Manual*, 2010.
- [36] SM Promet. *Łączniki miniaturowe – katalog*, 2010.
- [37] M. Trojanowski. *Automatyzacja w analizie chemicznej*. WNT, Warszawa, wydanie 1, 1992.
- [38] U. Wahren. *Practical Introduction to Pumping Technology*. Elsevier Science & Technology Books, wydanie 1, 1997.
- [39] J. Warych. *Aparatura chemiczna i procesowa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, wydanie 1, 1996.
- [40] L. Welling, L. Thomson. *PHP i MySQL. Tworzenie stron internetowych*. Helion, Gliwice, wydanie 3, 2005.