



# Spis treści

1.	<i>Wstęp</i>	1
1.1	Cel pracy	1
1.2	Układ pracy	1
2.	<i>Wprowadzenie teoretyczne</i>	2
2.1	Funkcjonowanie układu hormonalnego tarczycy	2
2.2	Symptomy	2
2.3	Czynniki ryzyka	3
2.4	Diagnoza choroby	4
2.5	Leczenie	5
3.	<i>Metodologia</i>	7
3.1	Założenia modelu	7
3.2	Funkcje stanu	7
3.3	Model matematyczny	8
3.4	Parametry modelu	9
3.5	Warunki początkowe modelu	11
3.6	Dane do symulacji	11
3.7	Stabilność układu	12
3.7.1	Twierdzenie	12
3.7.2	Analiza stabilności modelu	13
4.	<i>Część konstrukcyjna/Specyfikacja wewnętrzna</i>	16
4.1	Klasy aplikacji	16
4.2	Przepływ danych w aplikacji	17
4.3	Metody utworzonego programu	17
4.4	Wykorzystane funkcje programu Matlab	20
5.	<i>Instrukcja obsługi/Specyfikacja zewnętrzna</i>	23
5.1	Okno główne aplikacji	23
5.1.1	Wybór pacjenta	23
5.1.2	Wybór parametrów symulacji	23
5.1.3	Warunki początkowe	23
5.1.4	Symulacja	24
5.2	Okno symulacji	24

---

5.2.1	Wykres wyników symulacji . . . . .	25
5.2.2	Portrety fazowe oraz szczegóły symulacji . . . . .	26
6.	<i>Rezultaty</i> . . . . .	32
6.1	Wstępne porównanie pacjentów . . . . .	32
6.2	Pacjent numer 20 . . . . .	32
6.3	Pacjent numer 31 . . . . .	37
6.4	Pacjent numer 55 . . . . .	37
6.5	Pacjent numer 70 . . . . .	37
6.6	Porównanie zapotrzebowania na lek . . . . .	38
7.	<i>Podsumowanie</i> . . . . .	40
7.1	Wnioski . . . . .	40
	<i>Bibliografia</i> . . . . .	42

# Spis rysunków

2.1	Pętla sprzężenia zwrotnego, poprawnie działającej gospodarki hormonalnej tarczycy [3]. . . . .	3
2.2	Zahamowanie nadmiernej produkcji hormonów tarczycowych, spowodowanych odpowiedzią autoimmunologiczną, poprzez podanie leku przeciw-tarczycowego [3]. . . . .	5
4.1	Klasa StartData. . . . .	17
4.2	Klasa Simulation. . . . .	18
4.3	Klasa SimulationResult. . . . .	18
5.1	Okno główne aplikacji. . . . .	24
5.2	Wybór pacjenta. . . . .	25
5.3	Lista wyboru pacjenta. . . . .	25
5.4	Konfiguracja symulacji bez leczenia. . . . .	26
5.5	Konfiguracja zaawansowanego leczenia. . . . .	26
5.6	Przykładowe warunki początkowe. . . . .	26
5.7	Okno modalne oczekiwania na obliczenia. . . . .	27
5.8	Okno wyników symulacji. . . . .	27
5.9	Przedstawienie symulacji w czasie. . . . .	28
5.10	Narzędzie edycji wykresów. . . . .	29
5.11	Zapisane w katalogu wykresy wyników symulacji. . . . .	29
5.12	Przykładowy portret fazowy symulacji. . . . .	30
5.13	Szczegóły symulacji oraz wartości własne układu. . . . .	31
6.1	Porównanie poziomów fT4 i TRAb analizowanych pacjentów. . . . .	33
6.2	Symulacja pacjenta nr 20 bez leczenia, trwająca 10 dni. . . . .	33
6.3	Symulacja pacjenta nr 20, leczonego 30 mg leku, przez jeden dzień. . . . .	34
6.4	Symulacja pacjenta nr 20, leczonego 30 mg leku, przez 120 dni. . . . .	34
6.5	Symulacja pacjenta nr 20 podczas leczenia i odstawienia leku. . . . .	35
6.6	Symulacja pacjenta nr 20, przykładowa terapia, odstawienie i wznowienie terapii. . . . .	35
6.7	Symulacja pacjenta nr 20, sugerowana 12-miesięczna terapia. . . . .	36
6.8	Symulacja pacjent nr 31, sugerowana 18-miesięczna terapia. . . . .	37
6.9	Symulacja pacjenta nr 55, sugerowana 12-miesięczna terapia. . . . .	38
6.10	Symulacja pacjenta nr 70, sugerowana 14-miesięczna terapia. . . . .	39
6.11	Porównanie zapotrzebowania na lek pacjentów. . . . .	39

# Spis tabel

3.1	Parametry wejściowe układu równań różniczkowych. . . . .	10
3.2	Parametry modelu 3.1 wybranych pacjentów. . . . .	12
4.1	Klasy aplikacji. . . . .	16

# 1. Wstęp

Choroba Gravesa jest najczęstszą, idiopatyczną formą nadczynności tarczycy. To choroba autoimmunologiczna, powodowana nadaktywnością przeciwciał przeciw-tarczycowych (TRAb). Imitują one działanie hormonu TSH, stymulując receptory TSH (TSHR). Efektem jest nadprodukcja hormonów tarczycy: trójiodotyroniny (T3) i tyroksyny (T4) [9]. W konsekwencji prowadzi to do nadczynności tarczycy. Przyczyna choroby nie jest znana.

Standardowe leczenie obejmuje terapię lekami przeciw-tarczycowymi (*antithyroid drugs* - ATD). Jednym z nich jest metimazol, który hamuje działanie enzymu, odpowiadającego za syntezę hormonów tarczycy. Taka terapia skutkuje obniżeniem hormonów T3 i T4, jednak bardzo często występują reemisje.

## 1.1 Cel pracy

Celem pracy jest wsparcie lekarzy w leczeniu choroby autoimmunologicznej Gravesa. Zmniejszenie ilości stosowanego leku przeciw-tarczycowego lub terapia obniżająca ryzyko reemisji, zmniejszając ryzyko wystąpienia skutków ubocznych lub ich siłę. Wymaga to realizacji następujących etapów:

- zaznajomienie się z naturą problemu i potrzebami,
- zastosowanie modelu matematycznego odzwierciedlającego właściwe funkcje układu hormonalnego,
- opieranie się na dostępnych danych lub możliwych do wykonania badaniach
- zaadoptowanie modelu do pacjenta, bez potrzeby obserwacji postępów terapii,
- stworzenie prostego programu, ułatwiającego dobór terapii,
- test programu, poprzez dobór terapii dla prawdziwych danych pacjentów.

## 1.2 Układ pracy

NIEDOKOŃCZONE

*Czasem rozdział kończy się omówieniem zawartości pracy, tłumaczącym co czytelnik znajdzie w kolejnych jej rozdziałach. Każdy rozdział warto jest również poprzedzić krótkim wstępem.*

## 2. Wprowadzenie teoretyczne

### 2.1 Funkcjonowanie układu hormonalnego tarczycy

Działanie gospodarki hormonalnej tarczycy opisywane jest za pomocą pętli sprzężenia zwrotnego [8]. Stężenie hormonów tarczycowych jest sterowane przez centralny układ nerwowy.

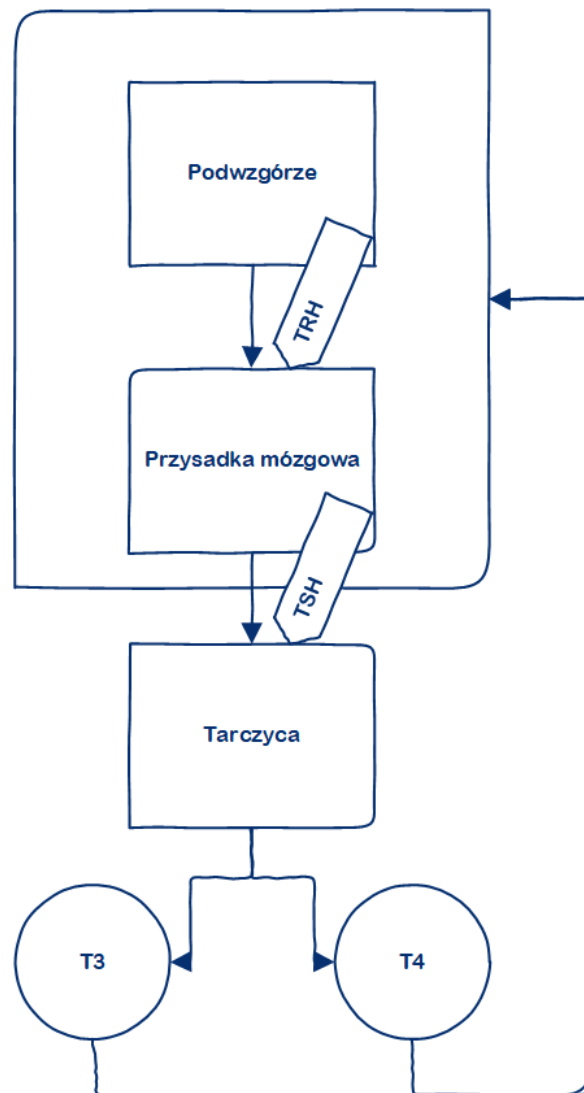
Podwzgórze produkuje tyreoliberynę (TRH), która uwalnia wyprodukowaną i zgazynowaną w przysadce mózgowej tyreotropinę (TSH). Jest ona wydzielana do gruczołów dokrewnych, w tym do gruczołu tarczycy, w którym powoduje wytwarzanie hormonów tarczycowych trójiodotyroniny (T3) i tyroksyny (T4). Wysoki poziom T3 i T4 hamuje wytwarzanie TSH, wykazując ujemne sprzężenie zwrotne (Rys. 2.1).

W chorobie Gravesa, przeciwciała przeciw-tarczycowe TRAb imitują działanie hormonu TSH, pochodzącego z przysadki mózgowej, aktywując produkcję hormonów tarczycowych [3]. W efekcie powstaje nadprodukcja hormonów tarczycowych T3 i T4, przy jednocześnie niskim poziomie TSH.

### 2.2 Symptomy

Hormony tarczycowe mają wpływ na wiele układów w całym organizmie, dlatego objawy i symptomy wywołane chorobą Gravesa mogą mieć szeroki zakres oraz znaczący wpływ na funkcjonowanie całego organizmu. Najczęstsze objawy to [8]:

- niepokój i nerwowość,
- drobne drżenie rąk i palców,
- zwiększona wrażliwość na ciepło, potliwość,
- utrata wagi, pomimo normalnych nawyków żywieniowych,
- powiększenie się gruczołów tarczycowych,
- zmiany w cyklach miesięczkowych,
- zaburzenia erekcji lub libido,
- częste wypróżnienia,



**Rys. 2.1:** Pętla sprzężenia zwrotnego, poprawnie działającej gospodarki hormonalnej tarczycy [3].

- wylupiaсте oczy,
- zmęczenie,
- cienka, czerwona skóra na łydkach lub wierzchołkach stóp,
- szybkie lub nieregularne bicie serca.

## 2.3 Czynniki ryzyka

Choroba Gravesa może wystąpić u każdego człowieka, jednak niektóre czynniki zwiększają prawdopodobieństwo jej wystąpienia [8]:

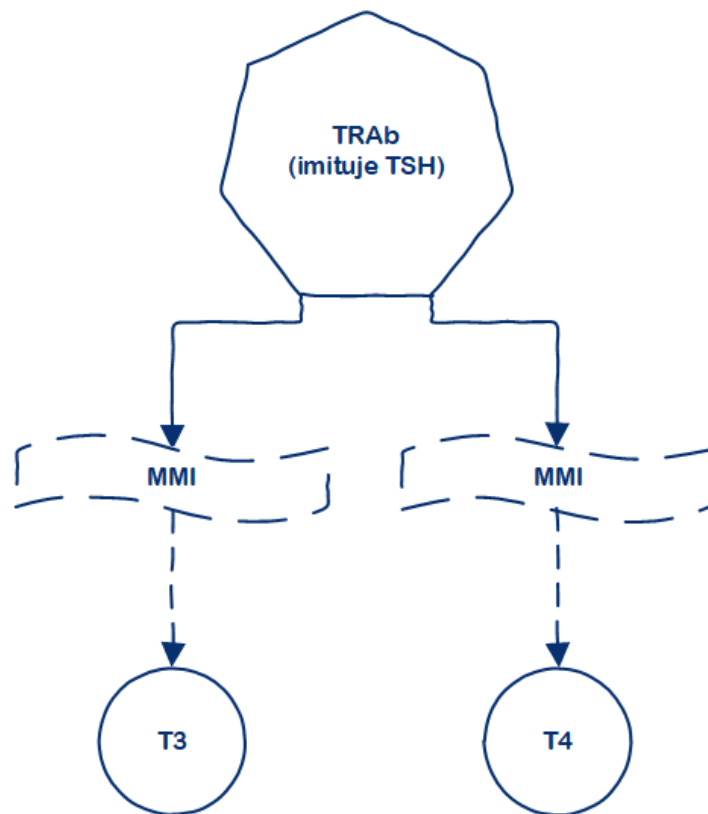


- choroba może być uwarunkowana genetycznie, ponieważ często jest dziedziczona;
- częściej występuje u kobiet, niż u mężczyzn;
- pojawia się najczęściej przed 40 rokiem życia;
- występuje z innymi zaburzeniami układu immunologicznego, takimi jak cukrzyca pierwszego stopnia czy reumatoidalne zapalenie stawów;
- u osób narażonych na emocjonalny lub fizyczny stres;
- ciąża lub niedawny poród może zwiększyć prawdopodobieństwo wystąpienia zaburzenia;
- palenie papierosów, które może wpływać na układ autoimmunologiczny.

## 2.4 Diagnoza choroby

Istnieje kilka możliwości diagnozowania nadczynności tarczycy oraz jej specyficznej odmiany, jaką jest choroba Gravesa. Są to:

- *Test fizyczny.* Lekarz sprawdza, czy oczy są podrażnione i wystające, a gruczoł tarczycowy jest powiększony. Choroba Gravesa zwiększa metabolizm, dlatego lekarz bada puls i ciśnienie krwi.
- *Badanie krwi.* Badanie mające na celu ustalenie poziomu TSH w krwi oraz hormonów tarczycowych. Normalny poziom TSH korelujący z wysokim poziomem T4 w formie wolnej (fT4), może świadczyć o nadczynności tarczycy. Dodatkowe badanie ilości przeciwciał przeciw tarczycowym TRAb, pozwala zdiagnozować chorobę Gravesa. Wysoki poziom TRAb i fT4 świadczą o podłożu autoimmunologicznym choroby, czyli chorobie Gravesa [3].
- *Badanie przyswajalności radioaktywnego jodu.* Organizm potrzebuje jodu, do produkcji hormonów tarczycowych. Podanie małej dawki radioaktywnego jodu oraz późniejszy pomiar ilości hormonów tarczycowych, pozwala ustalić przyswajalność jodu przez tarczycę. Dostarcza to informacji czy nadczynność tarczycy jest wywołana chorobą Gravesa.
- *Badanie USG.* Dzięki ultradźwiękom, możemy ustalić czy gruczoł tarczycowy jest powiększony. Jest to bezpieczne badanie, które może być stosowane podczas ciąży.



**Rys. 2.2:** Zahamowanie nadmiernej produkcji hormonów tarczycowych, spowodowanych odpowiedzią autoimmunologiczną, poprzez podanie leku przeciwtrzcycowego [3].

## 2.5 Leczenie

Leczenie choroby Gravesa, ma na celu zahamowanie produkcji hormonów tarczycowych oraz zmniejszenie ich negatywnego wpływu na organizm. Stosowane są [8]:

- terapia radioaktywnym jodem,
- leki przeciwtrzcycowe (na przykład metimazol),
- leki beta-adrenolityczne (beta-blockery),
- operacja chirurgiczna,
- leczenie objawu choroby Gravesa – oftalmopatii.

Jedną z możliwości terapii jest leczenie lekami przeciwtrzcycowymi, takimi jak metimazol (Rys. 2.2). Zmniejsza on produkcję hormonów tarczycowych poprzez zahamowanie enzymu peroksydazy tarczycowej (TPO), która bierze udział w syntezie hormonów tarczycowych poprzez utlenienie anionów jodu ( $I^-$ ). W skutek tego stężenie hormonów tarczycowych powraca do poziomu osoby zdrowej.

Dotychczas stosowane terapie lekami przeciwtrzcycowymi, są uniwersalne, pozbawione indywidualnego podejścia. W pracy przedstawiono program do symulacji terapii.

Na podstawie danych, pozyskanych z badań pacjenta, pozwala przewidzieć odpowiedź jego organizmu. Pozwala to skuteczniej zaplanować terapię i przewidzieć reemisję.

## 3. Metodologia

Dobór odpowiedniej dawki leku jest możliwy, poprzez symulację zachowania się organizmu pacjenta oraz jego odpowiedzi na terapię. Celem terapii jest osiągnięcie stanu, w którym ilość hormonu T4 w formie wolnej (oznaczana jako fT4 [10]), zmieni się do wartości charakterystycznej dla osoby zdrowej.

W napisanej przez Autora niniejszej pracy aplikacji okienkowej, zaimplementowano model matematyczny, przedstawiony w pracy Balamurugan Pandiyan i Stephen J. Merrill [3]. Wszelkie założenia i dane, zaczerpnięto z ich pracy.

### 3.1 Założenia modelu

Zaimplementowany model matematyczny pozwala obserwować poziom hormonu T3 w formie wolnej, przeciwciał TRAb, metimazolu we krwi pacjenta oraz rozmiar gruczołu tarczycy w czasie. Poniżej zostały wyszczególnione założenia modelu.

1. Przeciwciała tarczycowe TRAb imitują działanie TSH i stymulują komórki tarczycowe do wzrostu, produkcji i wydzielania hormonów tarczycy.
2. Po zażyciu doustnie leku w postaci metimazolu (MMI), jest on szybko i kompletnie absorbowany do surowicy krwi. Jego przyswajalność, jest estymowana i wynosi średnio 93%.
3. Tarczyca przyswaja MMI z krwi, który dezaktywuje funkcjonalny wzrost gruczołu.
4. Dawka leku wchłania się z krwi po jego spożyciu.
5. Rozmiar gruczołu tarczycy jest ukrytym kompartmentem w modelu.
6. Po doustnym podaniu leku, stężenie metimazolu w surowicy krwi wykazuje taką samą dynamikę, jak stężenie wewnątrz tarczycy.

### 3.2 Funkcje stanu

Rozważany model jest układem równań różniczkowych zwyczajnych w którym przyjmujemy następujące oznaczenia:

- $x(t)$  - ilość metimazolu (mg) na litr surowicy krwi w chwili czasowej  $t$ ,

- $y(t)$  - ilość hormonu FT4 (pg) na mililitr surowicy krwi w chwili czasowej  $t$ ,
- $z(t)$  - rozmiar funkcjonalny gruczołu tarczycy (ml) lub objętość aktywnych komórek w chwili czasowej  $t$ .
- $w(t)$  - ilość przeciwciał TRAb (U) na mililitr krwi w chwili czasowej  $t$ ,
- $s(t)$  - poziom MMI przyjętego doustnie na litr objętości ciała w chwili czasowej  $t$ .

### 3.3 Model matematyczny

Model symulujący leczenie pacjenta po przyjęciu metimazolu (MMI) 3.1.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = s(t) - \frac{(k_1 z)x}{k_a + x} - k_2 x \\ \frac{dy}{dt} = \frac{(k_3 z)w}{k_d + w} - k_4 y \\ \frac{dz}{dt} = k_5 \left( \frac{w}{z} - N \right) - k_6 z x \\ \frac{dw}{dt} = k_7 - \frac{k_7 x}{k_b + x} - k_8 w \end{cases} \quad (3.1)$$

Rozwiązania modelu przyjmują wartości nieujemne  $x(t) \geq 0, y(t) \geq 0, z(t) > 0, w(t) \geq 0$  dla dowolnej chwili czasowej  $t$ , z warunkami początkowymi  $E_0 = (x_0, y_0, z_0, w_0)$ . Szczegółowy opis układu znajduje się w dalszej części sekcji.

$$\frac{dx}{dt} = s(t) - \frac{(k_1 z)x}{k_a + x} - k_2 x \quad (3.2)$$

Równanie 3.2 opisuje tempo zmian ilości metimazolu w chwili  $t$ , które zależy od dawki metimazolu  $s(t)$  przyjętej przez pacjenta w chwili  $t$ , pomniejszonej o dwa składniki. Pierwszy składnik  $\frac{(k_1 z)x}{k_a + x}$ , zgodnie z równaniem Michaelisa-Mentena charakteryzuje tempo wchłaniania metimazolu (MMI) przez gruczoł tarczycy, z uwzględnieniem jego rozmiaru ( $z$ ), zakładając maksymalny wychwyt leku ( $k_1$ ). Drugi składnik  $k_2 x$  odzwierciedla wydalanie lub eliminację leku, przez mechanizm niespecyficzny. /todo wyjaśnić mechanizm niespecyficzny/

$$\frac{dy}{dt} = \frac{(k_3 z)w}{k_d + w} - k_4 y \quad (3.3)$$

Równanie 3.3 opisuje tempo zmian hormonu tyroksyny w formie wolnej (fT4) w chwili czasowej  $t$ . Pierwsze wyrażenie  $\frac{(k_3 z)w}{k_d + w}$ , opisuje znany z poprzedniego równania

(3.2) mechanizm Michaelisa-Mentena, wykorzystany do obliczenia wskaźnika wydzielania hormonu fT4. Jest on pomniejszony, o  $k_4y$  wskaźnik eliminacji fT4 z krwi.

$$\frac{dz}{dt} = k_5\left(\frac{w}{z} - N\right) - k_6zx \quad (3.4)$$

Równanie 3.4 opisuje zmiany funkcjonalnego rozmiaru gruczołu tarczycy. Pierwszy składnik  $k_5(\frac{w}{z} - N)$  zawiera współczynnik wzrostu ( $N$ ) i względny współczynnik wzrostu ( $k_5$ ), w obecności przeciwciał przeciwtarczycowych ( $w$ ) [6]. Drugi składnik  $k_6zx$  hamuje tempo zmian poprzez współczynnik funkcjonalnego rozmiaru tarczycy dla komórek nieaktywowanych przez leczenie MMI.

$$\frac{dw}{dt} = k_7 - \frac{k_7x}{k_b + x} - k_8w \quad (3.5)$$

Równanie 3.5 opisuje tempo zmian stężenia przeciwciał przeciwtarczycowych. Parametr  $k_7$  przedstawia maksymalną produkcję przeciwciał TRAb, spowodowaną odpowiedzią autoimmunologiczną, zaś wyrażenie  $\frac{k_7x}{k_b + x}$ , uwzględnia mechanizm hamowania odpowiedzi immunologicznej, spowodowany podaniem metimazolu. Ostatnie wyrażenie  $k_8w$ , odnosi się do eliminacji TRAb spowodowanego leczeniem.

### 3.4 Parametry modelu

Na podstawie literatury [3] przyjęto wartości parametrów modelu, zebrane w tabeli (Tab. 3.1).

Maksymalna szybkość przyswajania MMI wzrasta wraz ze zwiększaniem dawki leku, przy czym powyżej 15 mg/dzień, wzrost ten można pominąć, zatem można przyjąć, iż maksymalne wchłanianie leku następuje dla dawki 15 mg/dzień. Zakładając, że standardowa objętość funkcjonalna gruczołu tarczycy podczas nadczynności wynosi 30 ml, a standardowa objętość organizmu to 59,71 l, estymujemy parametr  $k_1 = \frac{15}{30 \cdot 59,71} = 8,374 \cdot 10^{-3} \text{ mg/ml} \cdot \text{ldzień}$ .

Zakładając, że mechanizm wydalania MMI jest wykładniczy (malejącą funkcją wykładniczą) wyznaczamy parametr  $k_2$  z zależności  $k_2 = \frac{\ln(2)}{5h} = 3,43711/\text{dzień}$ .

Metimazol jest metabolizowany w wątrobie [7], która maksimum wydajności osiąga w trakcie aktywności człowieka, kiedy jest najedzony [5]. Największe wydalanie metimazolu, występuje około godziny 12 dla maksymalnej przyjętej dawki 15 mg/dzień [3]. Ta informacja pozwala określić wartość  $k_a = 0.358068 \text{ mg/l}$  przez symulacje, korzystając z równania dynamicznego Michealisa-Mentena.

Parametr  $k_3$  jest przekształconym równaniem 3.3 modelu. Posiadając informacje z badań pacjentów podczas ich pierwszej wizyty, możemy obliczyć  $k_3 = \frac{k_4y_0(k_d + w_0)}{z_0w_0}$ .

Parametr  $k_d$  został estymowany w programie Matlab, używając procedury optymalizacyjnej **fmincon** z dolną granicą wynoszącą 0.05 i górną granicą 0.1.

**Tab. 3.1:** Parametry wejściowe układu równań różniczkowych.

Parametr	Opis	Wartość	Jednostka
$k_1$	Względne maksimum wykorzystania MMI.	$8,374 \cdot 10^3$	mg/(ml · l/dzień)
$k_2$	Wskaźnik eliminacji MMI.	3,3271	1/dzień
$k_a$	Stała Michealisa-Mentena połowicznego maksymalnego wykorzystania MMI.	0,358068	mg/L
$k_3$	Względne maksimum sekrecji FT4.	Indywidualne	pg/(ml <sup>2</sup> · dzień)
$k_d$	Stała Michealisa-Mentena połowicznej maksymalnej sekrecji FT4.	Indywidualne	U/ml
$k_4$	Wskaźnik eliminacji FT4.	0,099021	1/dzień
$k_5$	Względny współczynnik wzrostu gruczołu tarczycy.	Indywidualne	ml <sup>3</sup> /(U · dzień)
N	Maksymalny współczynnik wzrostu gruczołu tarczycy.	Indywidualne	U/(ml <sup>2</sup> )
$k_6$	Współczynnik nieaktywnych komórek tarczycy.	0,001	ml/(mg · dzień)
$k_7$	Maksymalny współczynnik produkcji przeciwciał TRAb.	Indywidualne	U/(ml · dzień)
$k_b$	Współczynnik hamowania produkcji przeciwciał.	Indywidualne	mg/L
$k_8$	Wskaźnik eliminacji TRAb.	0,035	1/dzień

Parametr  $k_4$  to współczynnik wydalania fT4 z organizmu. Zakładając niespecyficzny mechanizm, współczynnik wydalania jest wykładniczy (malejącą funkcją wykładniczą) i może być wyliczony jako  $k_4 = \frac{\ln(2)}{7dni} = 0.099021$  l/dzień.

$$\text{Następnie } k_3 = \frac{k_4 y_0 (k_d + w_0)}{z_0 w_0}.$$

Parametry  $k_5$  oraz  $k_6$  zostały wyznaczone w drodze symulacji.

Parametr N, został wyliczony bazując na danych TRAb i fT4 pacjenta  $N = \frac{w_0}{z_0}$ .

Parametr  $k_8$  określa czas życia przeciwciał. Zakłada się, że jest on wykładniczy (ma-

lejącą funkcją wykładniczą) i może zostać wyliczony jako  $k_8 = \frac{\ln(2)}{20dni} = 0.035 \text{ l/dzień}$ .

Parametr  $k_7$  został estymowany jako  $k_7 = k_8 \cdot w_0$ .

Parametr  $k_b$  jest współczynnikiem połowicznego maksymalnego hamowania stężenia przeciwciał TRAb (stała Michealisa-Mentena), który estymujemy, za pomocą procedury **fmincon** w dolną granicą 3 i górną 12.

### 3.5 Warunki początkowe modelu

Warunki początkowe modelu  $E_0 = (x_0, y_0, z_0, w_0)$ , zostały ustalone w sposób następujący:

Stężenie początkowe FT4 ( $y_0$ ) oraz przeciwciał TRAb ( $w_0$ ) pochodzi z badań podczas pierwszej wizyty pacjenta.

Początkowe stężenie MMI ( $x_0$ ) w surowicy krwi wyliczono zgodnie ze wzorem 3.6 na podstawie przyjętej dawki leku w stosunku do jego dystrybucji w objętości surowicy krwi równej 3 litry.

$$x_0 = \frac{\text{Dawka leku}}{\text{Objętość dystrybucji leku w surowicy krwi}} \quad (3.6)$$

Początkowy rozmiar funkcjonalny tarczycy ( $z_0$ ) można wyznaczyć przyjmując założenie, że w chwili początkowej  $t_0$  tempo zmian MMI w surowicy krwi jest zerowe, zatem pierwsze równanie układu 3.2 przyjmuje postać:  $0 = s(t) - \frac{k_1 z_0 \cdot x_0}{k_a + x_0} - k_2 x_0$ . Wyliczając z tej równości  $z_0$ , otrzymujemy:

$$z_0 = \frac{(s(t) - k_2 x_0)(k_a + x_0)}{k_1 x_0} \quad (3.7)$$

### 3.6 Dane do symulacji

W niniejszej pracy przeprowadzono szereg symulacji modelu leczenia choroby Gravesa na podstawie danych dołączonych do artykułu [3]. Pochodzą one z badań 23 pacjentów i zawierają informacje dotyczące poziomu fT4, TRAb oraz dniu terapii w którym badanie zostało przeprowadzone.

Pełna pula badań obejmowała ponad 70 chorych, przy czym do analizy wybrano tych pacjentów, których badania były kompletne tzn. obejmowały pełny zestaw danych. U wielu pacjentów występują braki dotyczące badania TRAb, ponieważ przy wizycie kontrolnej, pomiar fT4 jest wystarczający, do określenia stadium choroby.

W przeprowadzonych symulacjach wykorzystano jedynie dane z pierwszej wizyty pacjenta. Pomiary w trakcie leczenia zostały użyte do weryfikacji poprawności działania modelu.

Do analiz na potrzeby tej pracy, wykorzystano dane czterech pacjentów, zachowując ich oryginalne oznaczenia (pacjent nr 20, 31, 55, 70). Parametry dla wybranych pacjentów zostały przedstawione w tabeli (Tab. 3.2).



**Tab. 3.2:** Parametry modelu 3.1 wybranych pacjentów.

Parametr	Pacjent nr 20	Pacjent nr 31	Pacjent nr 55	Pacjent nr 70
$k_1$	$8,374 \cdot 10^3$	$8,374 \cdot 10^3$	$8,374 \cdot 10^3$	$8,374 \cdot 10^3$
$k_2$	3,3271	3,3272	3,3273	3,3274
$k_a$	0,358068	0,358068	0,358068	0,358068
$k_3$	0,085	0,08975	0,08992	0,11784
$k_d$	0,067	0,07	0,081	0,075
$k_4$	0,099021	0,099021	0,099021	0,099021
$k_5$	$10^6$	$10^6$	$10^6$	$10^6$
N	0,25	0,058	0,207	0,293
$k_6$	0,001	0,001	0,001	0,001
$k_7$	0,26	0,061	0,22	0,308
$k_b$	4,95	11,8	4,09	3,15
$k_8$	0,035	0,035	0,035	0,035

### 3.7 Stabilność układu

Przeanalizowano stabilność układu 3.1 dla nieleczzonej nadczynności tarczycy, spowodowanej chorobą Gravesa. Analizę przeprowadzono w oparciu o twierdzenie o stabilności układu.

#### 3.7.1 Twierdzenie

Niech funkcje  $f_i(y_1, y_2, \dots, y_n)$  mają ciągłe pochodne cząstkowe pierwszego rzędu  $(\frac{\partial f_i}{\partial y_j})$ , gdzie  $1 \leq i, j \leq n$ , w otoczeniu punkt równowagi  $P = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  układu. Dodatkowo niech

$$J(a_1, a_2, \dots, a_n) = \begin{bmatrix} (\frac{\partial f_1}{\partial y_1}) & (\frac{\partial f_1}{\partial y_2}) & \dots & (\frac{\partial f_1}{\partial y_n}) \\ (\frac{\partial f_2}{\partial y_1}) & (\frac{\partial f_2}{\partial y_2}) & \dots & (\frac{\partial f_2}{\partial y_n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\frac{\partial f_n}{\partial y_1}) & (\frac{\partial f_n}{\partial y_2}) & \dots & (\frac{\partial f_n}{\partial y_n}) \end{bmatrix},$$

gdzie pochodne cząstkowe obliczane są w punkcie  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ .

Wówczas:

1. jeżeli wszystkie wartości własne macierzy Jacobiego  $J(P)$  mają ujemne części rzeczywiste, to punkt  $P = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  jest asymptotycznie stabilnym punktem równowagi układu
2. jeżeli co najmniej jedna wartość własna macierzy  $J(P)$  ma dodatnią część rzeczywistą, to punkt  $P = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  jest niestabilnym punktem równowagi układu autonomicznego.

### 3.7.2 Analiza stabilności modelu

Dla osoby zdrowej  $s(t) = 0$  i układ 3.1 przyjmuje postać:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{(k_1 z)x}{k_a + x} - k_2 x \\ \frac{dy}{dt} = \frac{(k_3 z)w}{k_d + w} - k_4 y \\ \frac{dz}{dt} = k_5 \left( \frac{w}{z} - N \right) - k_6 z x \\ \frac{dw}{dt} = k_7 - \frac{k_7 x}{k_b + x} - k_8 w \end{cases} \quad (3.8)$$

Chcąc sprawdzić zachowanie się modelu dla osoby zdrowej wyznaczamy punkty stacjonarne układu

$$\begin{cases} f(x, y, z, w) = \frac{(k_1 z)x}{k_a + x} - k_2 x \\ g(x, y, z, w) = \frac{(k_3 z)w}{k_d + w} - k_4 y \\ h(x, y, z, w) = k_5 \left( \frac{w}{z} - N \right) - k_6 z x \\ m(x, y, z, w) = k_7 - \frac{k_7 x}{k_b + x} - k_8 w \end{cases} \quad (3.9)$$

rozwiązując układ równań  $[ f(x, y, z, w) = 0 \wedge g(x, y, z, w) = 0 \wedge h(x, y, z, w) = 0 \wedge m(x, y, z, w) = 0 ]$ .

Dla osoby zdrowej otrzymujemy dokładnie jeden punkt stacjonarny  $E_1 = (x_1, y_1, z_1, w_1)$ ,

gdzie

$$\begin{cases} x_1 = 0 \\ y_1 = \frac{k_3 k_3^2}{k_4 k_8 N (k_8 k_d + k_7)} \\ z_1 = \frac{k_7}{k_8 N} \\ w_1 = \frac{k_7}{k_8} \end{cases} \quad (3.10)$$

Aby sprawdzić stabilność punktu  $E_1$  wyznaczamy macierz Jacobiego  $J(x, y, z, w)$  pochodnych cząstkowych funkcji  $f, g, h, m$ , tzn. macierz:

$$J((x, y, z, w)) = \begin{bmatrix} \frac{-(k_1 k_a z + k_2 (x + k_a)^2)}{(x + k_a)^2} & 0 & \frac{-x k_1}{(x + k_a)} & 0 \\ 0 & -k_4 & \frac{w k_3}{w + k_d} & \frac{z k_3 k_d}{(w + k_d)^2} \\ -z k_6 & 0 & \frac{-w k_5}{z^2} - x k_6 & \frac{k_5}{z} \\ \frac{-k_7 k_b}{(x + k_b)^2} & 0 & 0 & -k_8 \end{bmatrix},$$

Dla punktu  $E_1$  otrzymujemy  $J(E_1)$ :

$$J(E_1) = \begin{bmatrix} -\frac{k_1 k_7}{k_8 N k_a} - k_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_4 & \frac{k_3 k_7}{k_8 k_d + k_7} & \frac{k_3 k_7 k_8 k_d}{N (k_8 k_d + k_7)^2} \\ -\frac{k_6 k_7}{k_8 N} & 0 & \frac{k_5 k_8 N^2}{k_7} & \frac{k_5 k_8 N}{k_7} \\ \frac{k_7}{k_b} & 0 & 0 & -k_8 \end{bmatrix},$$

Wartości własne macierzy oblicza się za pomocą równania charakterystycznego macierzy w postaci  $\det(J(E_1) - \lambda I) = 0$ . Wartości własne przedstawiają się następująco:

$$\begin{cases} \lambda_1 = -k_4 \\ \lambda_2 = -k_8 \\ \lambda_3 = -\frac{k_1 k_7}{k_8 N k_a} - k_2 \\ \lambda_4 = -\frac{k_5 k_8 N^2}{k_7} \end{cases} \quad (3.11)$$

Wszystkie wartości własne mają znak ujemny oraz parametry je opisujące są dodatnie. Wynika z tego, że wszystkie wartości własne macierzy  $J(E_1)$  mają ujemne części rzeczywiste. Według twierdzenia o stabilności układu 3.7.1, układ jest układem asymptotycznie stabilnym.

## 4. Część konstrukcyjna/Specyfikacja wewnętrzna

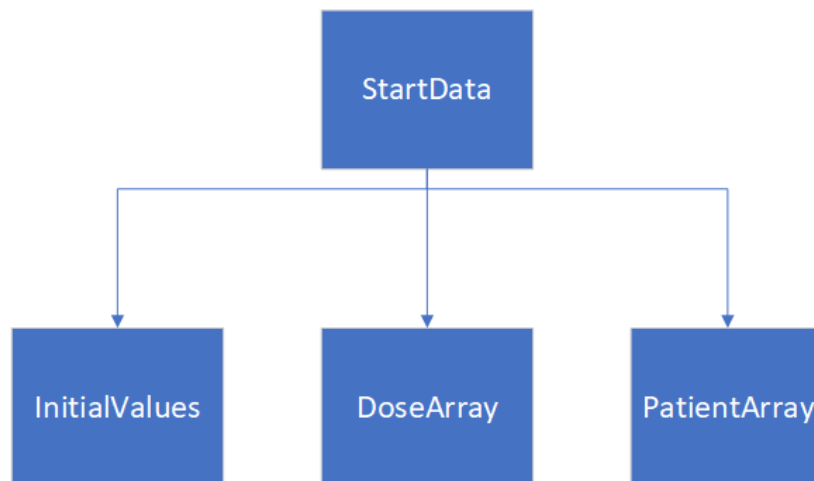
Projekt został zrealizowany w programie MATLAB. Jest to środowisko do wykonywania obliczeń naukowych i inżynierskich, oraz do tworzenia symulacji komputerowych [1]. Do utworzenia graficznego interfejsu, użyto stosunkowo nowego narzędzia programu MATLAB - środowiska Appdesigner.

### 4.1 Klasy aplikacji

Utworzono kilka klas, których opis zawarto w tabeli (Tab. 4.1).

**Tab. 4.1:** Klasy aplikacji.

Nazwa klasy	Opis
Patient	Parametry pacjenta oraz wyniki pierwszego badania fT4 i TRAb.
Dose	Ilość metimazolu i czasu dawki leczenia.
InitialValues	Warunki początkowe symulacji.
StabilityPoint	Punkty stacjonarne układu.
Eigen	Wartości własne układu.
T	Wektor z punktami czasowymi symulacji.
X	Rozwiązania równań różniczkowych.
StartData	Wszystkie pola i struktury potrzebne do startu aplikacji.
Simulation	Wszystkie pola i struktury potrzebne do rozpoczęcia symulacji.
SimulationResult	Wszystkie pola i struktury potrzebne do wyświetlenia wyników symulacji.



Rys. 4.1: Klasa StartData.

Aplikacja przesyła dane głównie pomiędzy dwoma widokami:

1. App - Widok w którym aplikacja jest inicjalizowana. Wczytujemy dane, wybieramy szczegóły symulacji oraz ją rozpoczynamy.
2. SimulationView - Widok w którym obserwujemy symulację.

## 4.2 Przepływ danych w aplikacji

Do przekazania danych pomiędzy widokami aplikacji, służą głównie trzy klasy. Są to:

1. StartData (Rys. 4.1),
2. Simulation (Rys. 4.2),
3. SimulationResult (Rys. 4.3).

## 4.3 Metody utworzonego programu

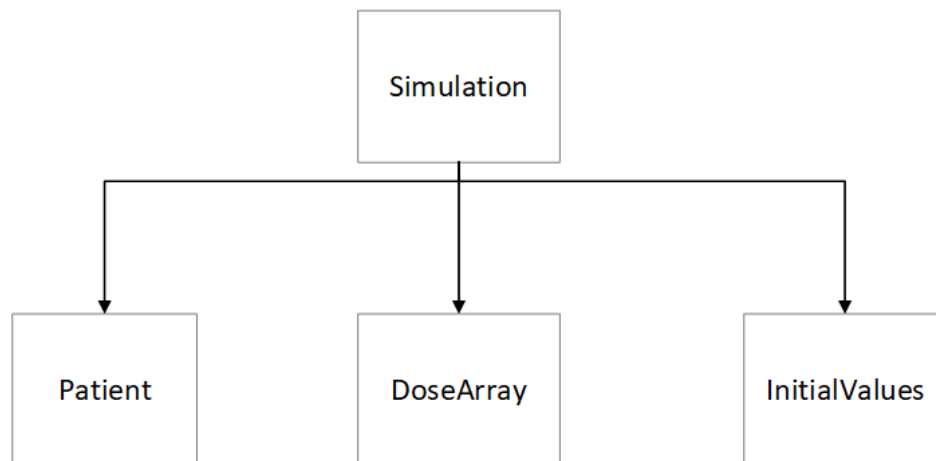
### *Simulate*

Metoda *Simulate* zajmuje się wszystkimi obliczeniami związanymi z symulacją. Przyjmuje obiekt typu Simulation (Rys. 4.2) i zwraca SimulationResult (Rys. 4.3).

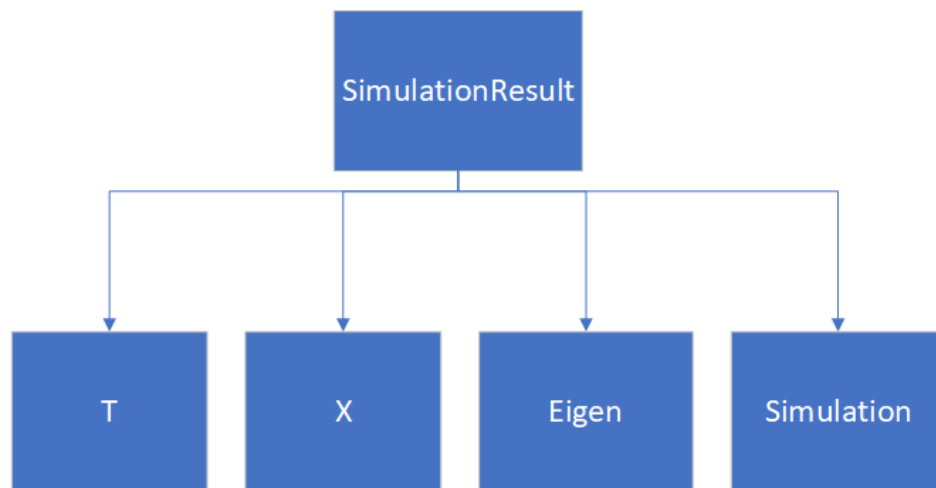
---

```
function SimulationResult = Simulate(Simulation)
```

---



Rys. 4.2: Klasa Simulation.



Rys. 4.3: Klasa SimulationResult.

### *UkladRownan*

Metoda *UkladRownan* przyjmuje chwilę czasową  $t$ , warunki początkowe modelu, parametry pacjenta oraz dawki leczenia. Metoda ta jest wykorzystywana przez solver *ode45* do symulacji modelu w każdej chwili czasowej  $t$ . Zwraca rozwiązania układu równań różniczkowych 3.1.

---

```
function rownania = UkladRownan(t, InitialValuesVector, PatientVector,
    DoseVector)
```

---

### *TreatmentDose*

Metoda *TreatmentDose* przyjmuje dawki leku, długość terapii w dniach oraz chwilę czasową  $t$ . Metoda ta jest wykorzystywana przez solver *ode45*, do obliczania przyjm-

wanej dawki MMI czyli wartości funkcji  $s(t)$ .

---

```
function s = TreatmentDose(DOSES, DAYS, t)
```

---

#### *StabilityPoints*

Metoda *StabilityPoints* przyjmuje parametry pacjenta i zwraca stabilny punkt stacjonarny w przestrzeni 4-wymiarowej.

---

```
function points = StabilityPoints(patient)
```

---

#### *JacobainMatrix*

Metoda *JacobainMatrix* przyjmuje parametry pacjenta i warunki początkowe. Zwraca macierz Jacobiego dla danego układu.

---

```
function matrix = JacobainMatrix( patient, initialValues )
```

---

#### *ConvertStringToNArray*

Metoda *ConvertStringToNArray* konwertuje napis na tablicę liczb. Jako, że jest to osobna metoda w programie, została sprawdzona testem jednostkowym.

---

```
function [arrayOutput] = ConvertStringInputToNArray(textInput)
```

---

#### *Test\_convertStringInputToNArray*

Test jednostkowy - implementacja skryptu:

---

```
input = '10, 12, 20, 30';
expected = [10 12 20 30 0]; % N element array

result = ConvertStringInputToNArray(input, 5);

if isequal(result, expected)
    disp('convertStringInputToNArray correct!');
else
    disp('convertStringInputToNArray failed!');
end
```

---

#### *ParsingErrorDialog*

Niektóre z wprowadzanych danych są napisami, dlatego aplikacja jest zabezpieczona metodą *ParsingErrorDialog* przed niepoprawnymi wpisami. Użytkownik otrzymuje



stosowne powiadomienie o błędzie.

---

```
function ParsingErrorDialog(axis)
```

---

#### *ShowSimulation*

Do narysowania przebiegów czasowych rozwiązań modelu 3.1 służy metoda *ShowSimulation*. Jako parametry przyjmuje ona wykres (UIAxes), dane do wykreślenia (T, X) oraz tytuł wykresu (pLabel).

---

```
function ShowSimulation( UIAxes, T, X, pLabel )
```

---

#### *PrintFigure*

Appdesigner nie obsługuje zaawansowanej manipulacji wykresami, dlatego do zapisania wykresu należy utworzyć figurę typu widmo, kopiując wszystkie informacje z poprzedniego wykresu. Służy do tego metoda *PrintFigure*.

---

```
function PrintFigure(plotFigure, name)
```

---

#### *PlotPhase*

Do narysowania portretów fazowych symulacji, służy metoda *PlotPhase*.

---

```
function PlotPhase(ax, x, y, px, py, xlab, ylab)
```

---

#### *FindFT4NormalRange*

*FindFT4NormalRange* jest funkcją dodatkową. Nie jest zaimplementowana w graficznym interfejsie aplikacji. Wypisuje w konsoli programu Matlab ilość dni, po których pacjent, osiąga graniczny poziom fT4, dla osoby zdrowej.

---

```
function timeUpFT4 = FindFT4NormalRange(T, X)
```

---

## 4.4 Wykorzystane funkcje programu Matlab

#### *Ode45*

Do rozwiązywania układu równań różniczkowych 3.1 użyto wbudowanej funkcji Matlabu **ode45**. Początkowo użyto bazowej wersji funkcji ode45:

---

```
[t,y] = ode45(odefun(t,y,A,B),tspan,y0)
```

---

Parametry funkcji:

- `odefun` - funkcja zwracająca równania różniczkowe w chwili `t` 4.3,
- `tspan` - przedział czasowy symulacji,
- `y0` - warunki początkowe układu 3.1,
- `A` i `B` - wektory dodatkowych parametrów.

Funkcja `ode45` zwraca wektor `[t,y]` gdzie:

- `t` - wektor czasu,
- `y` - wektor rozwiązań układu równań różniczkowych 3.1.

W celu optymalizacji wykorzystywanej przez program pamięci użyto przeciążenia metody `ode45`, która może przyjąć dodatkowe parametry `A` i `B`, bez umieszczania ich w macierzy wynikowej `y`. Za pomocą parametrów `A`, `B` przekazywane są dane wybranego pacjenta oraz dawki leku. Dzięki takiemu rozwiązaniu, symulacja wykorzystuje czterokrotnie mniej miejsca pamięci RAM.

---

```
[t,y] = ode45(@(t,y) odefcn(t,y,A,B), tspan, y0);
```

---

*Eig*

---

```
e = eig(A)
```

---

Funkcja `eig` przyjmuje jako parametr macierz kwadratową `A`, zaś zwraca wektor kolumnowy z wartościami własnymi macierzy `A`.

*Solve*

---

```
results = solve(eqns, syms);
```

---

Funkcja `Solve` rozwiązuje układ równań używając zmiennych symbolicznych. Przyjmuje dwa parametry:

- `eqns` - tablicę równań,
- `syms` - tablicę zmiennych symbolicznych użytych w równaniach.

Funkcja zwraca wyniki dla zmiennych symbolicznych.

*Find*

---

```
k = find(X,n,direction)
```

---

Funkcja *find* przeszukuje wartości tablicy lub listy, zwracając indeksy, dla których równanie jest prawdziwe. Jako argumenty przyjmuje trzy zmienne:

- X - równanie zawierające tablicę do przeszukania i zmienną do której przyrównuje,
- n - ilość indeksów, które pierwsze zostaną przyporządkowane,
- direction - kierunek przyporządkowania.

*Strsplit*

---

```
C = strsplit(str,delimiter)
```

---

Funkcja *strsplit* dzieli napis na tablicę napisów w miejscach określonego znaku i zwraca tablicę napisów. Parametry funkcji to:

- str - napis,
- delimiter - znak, w którego miejscach napis jest rozłączany.

## 5. Instrukcja obsługi/Specyfikacja zewnętrzna

W tej części zostanie szczegółowo omówiony program autora pracy wraz z instrukcją jego obsługi.

### 5.1 Okno główne aplikacji

Rys. 5.1 przedstawia główne okno aplikacji. Służy ono do konfiguracji symulacji, którą można podzielić na trzy części.

#### 5.1.1 Wybór pacjenta

W pierwszej części, którą przedstawia rys. 5.2, użytkownik wybiera pacjenta, dla którego przeprowadzane są symulacje. Parametry, charakterystyczne dla tego pacjenta zamieszczone są w tabeli. Do wyboru jest czterech pacjentów (Rys. 5.3), którzy są analizowani w tej pracy. Dodatkowych pacjentów należy dodać z poziomu kodu.

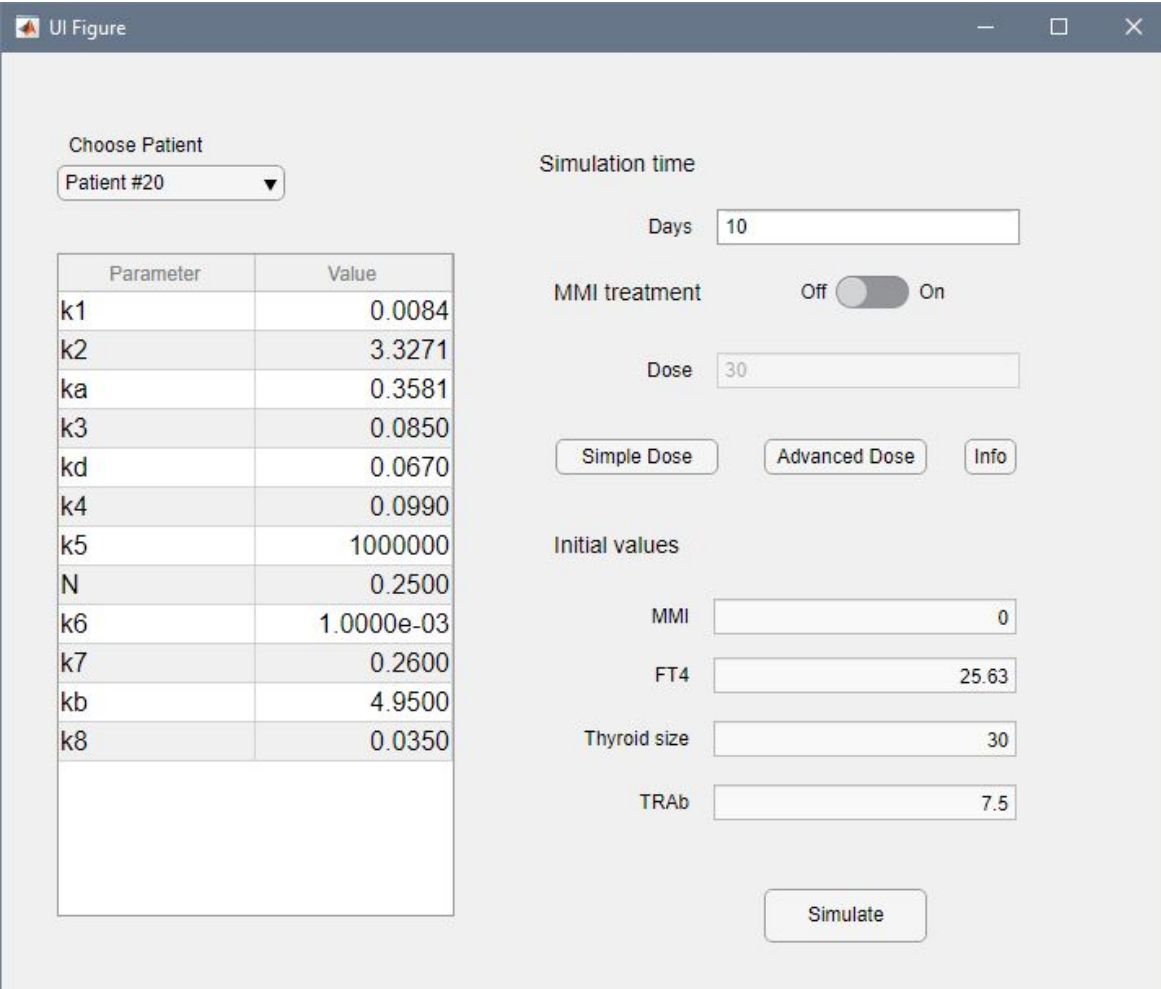
#### 5.1.2 Wybór parametrów symulacji

Ta część służy do wyboru parametrów symulacji (Rys. 5.4): czasu, leczenia i dawki metimazolu. W pierwszym polu wpisuje się czas symulacji wyrażony w dniach. Następnie na włączniku, możemy wybrać, leczenie lub brak leczenia dla wybranego pacjenta. Włączenie terapii aktywuje pole dawki leku, w którym wybiera się ilość metimazolu, jaką codziennie przyjmuje pacjent.

Terapie mogą być bardzo skomplikowane, dlatego istnieje możliwość utworzenia serii leczenia. Wystarczy wpisać we wskazane pola kilka wartości po przecinku. Dla ułatwienia poniżej umieszczono trzy przyciski (Rys. 5.4). Pierwsze dwa: *Simple Dose* i *Advanced Dose*, automatycznie wpisują w omawiane wcześniej pola domyślne, przykładowe terapie. Trzeci przycisk *Info* podaje informację, jak wypełniać pola. Na rysunku (Rys. 5.5) pokazano wprowadzenie przykładowej zaawansowanej terapii.

#### 5.1.3 Warunki początkowe

Warunki początkowe są w pełni zautomatyzowane (Rys. 5.6). Poziom fT4, przeciwciał i wielkość komórek ustalają się po wyborze pacjenta, zaś pole MMI ustawia się po



The screenshot shows the 'UI Figure' application window. It features a 'Choose Patient' dropdown menu set to 'Patient #20'. Below this is a table with 11 rows of parameters and their values. To the right, there are input fields for 'Simulation time' (Days: 10), 'MMI treatment' (a toggle switch set to 'Off'), and 'Dose' (30). Below these are three buttons: 'Simple Dose', 'Advanced Dose', and 'Info'. Further down, under 'Initial values', are input fields for 'MMI' (0), 'FT4' (25.63), 'Thyroid size' (30), and 'TRAb' (7.5). A 'Simulate' button is located at the bottom right.

Parameter	Value
k1	0.0084
k2	3.3271
ka	0.3581
k3	0.0850
kd	0.0670
k4	0.0990
k5	1000000
N	0.2500
k6	1.0000e-03
k7	0.2600
kb	4.9500
k8	0.0350

Rys. 5.1: Okno główne aplikacji.

wybraniu dawki.

#### 5.1.4 Symulacja

Naciśnięcie przycisku symulacji, rozpoczyna obliczenia. Oczekiwanie potwierdza okno modalne z paskiem postępu (Rys. 5.7).

## 5.2 Okno symulacji

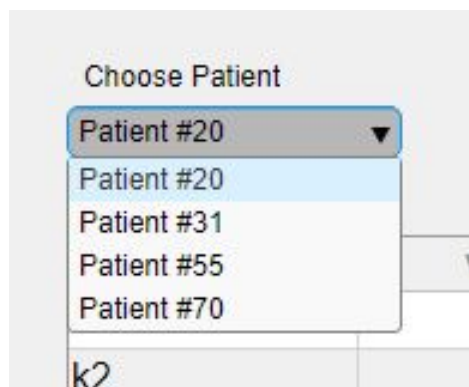
Okno symulacji (Rys. 5.8) pokazuje się po wykonaniu obliczeń. Ma za zadanie przedstawić symulację w czasie, ale również jako portrety fazowe poszczególnych funkcji stanu. Wyświetla także szczegółowe informacje o konfiguracji bieżącej symulacji.

Choose Patient

Patient #20 ▼

Parameter	Value
k1	0.0084
k2	3.3271
ka	0.3581
k3	0.0850
kd	0.0670
k4	0.0990
k5	1000000
N	0.2500
k6	1.0000e-03
k7	0.2600
kb	4.9500
k8	0.0350

Rys. 5.2: Wybór pacjenta.



Rys. 5.3: Lista wyboru pacjenta.

### 5.2.1 Wykres wyników symulacji

Symulacja przedstawiona w czasie została ukazana na rys. 5.9. Wykres zawiera obszerny tytuł z istotnymi informacjami terapii pacjenta. Każda z funkcji stanu, jest określona odmiennym kolorem. Dla ułatwienia rozpoznania stadium choroby, przerywanymi liniami zostały zaznaczone standardowe ilości fT4 dla osoby zdrowej. Do wykresu dołączona jest legenda.

Nad wykresem znajdują się dwa przyciski *Figure* oraz *Print & Copy. Figure* deleguje

Simulation time

Days

MMI treatment ☐ Off ☒ On

Dose

Rys. 5.4: Konfiguracja symulacji bez leczenia.

Simulation time

Days

MMI treatment ☐ Off ☒ On

Dose

Rys. 5.5: Konfiguracja zaawansowanego leczenia.

Initial values

MMI

FT4

Thyroid size

TRAb

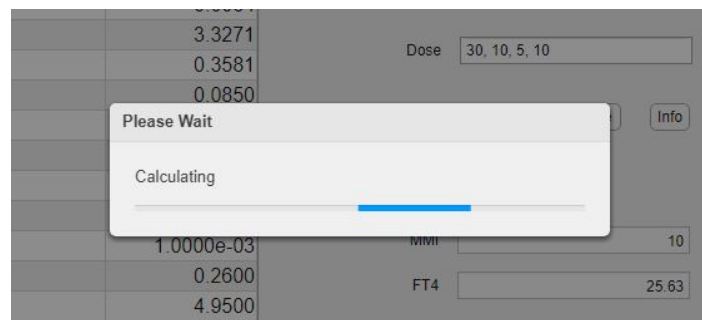
Rys. 5.6: Przykładowe warunki początkowe.

wykres do zaawansowanego narzędzie edycji wykresów (Rys. 5.10). Przycisk *Print & Figure* zapisuje wykres w katalogu programu, ze szczegółową nazwą pliku oraz kopiuje go do schowka (Rys. 5.11).

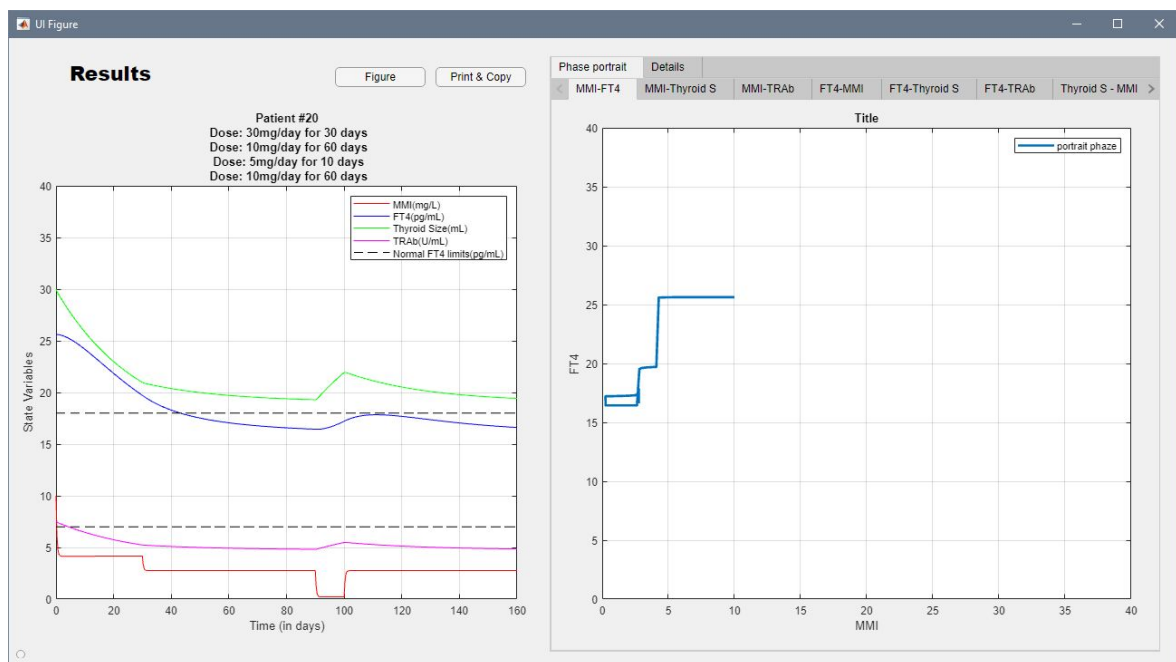
## 5.2.2 Portrety fazowe oraz szczegóły symulacji

Prawa część okna wyników symulacji zawiera dwie zakładki: *Phase portrait* oraz *Details*. Po starcie okna, domyślnie wyświetlana jest zakładka *Phase portrait* (Rys. 5.12), zawierająca poszczególne portrety fazowe w płaszczyznach dwuwymiarowych. Dla funkcji określonej w przestrzeni czterowymiarowej, takich portretów w przestrzeni dwuwymiarowej jest 8.

Po naciśnięciu zakładki *Details*, otwiera się część informująca użytkownika o szczegółach symulacji oraz o wartościach własnych układu (Rys. 5.13), obliczonych dla wy-



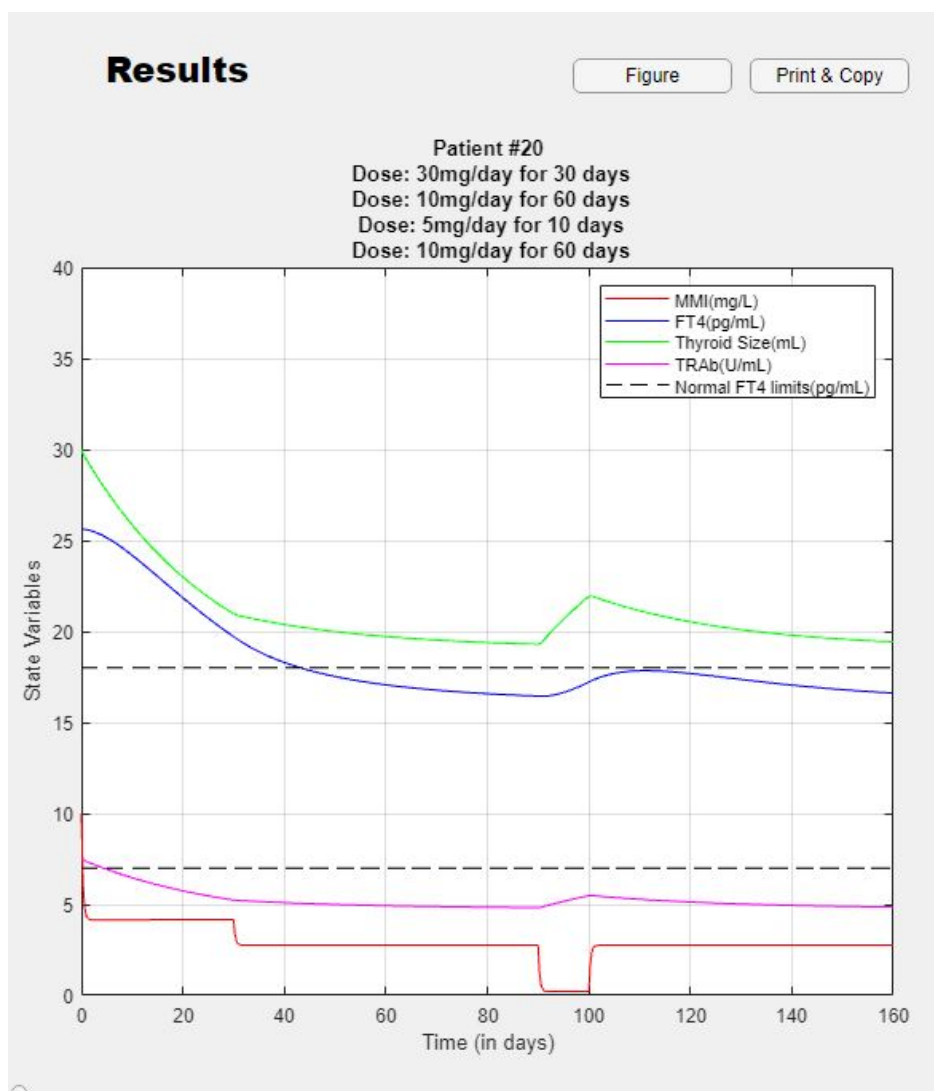
Rys. 5.7: Okno modalne oczekiwania na obliczenia.



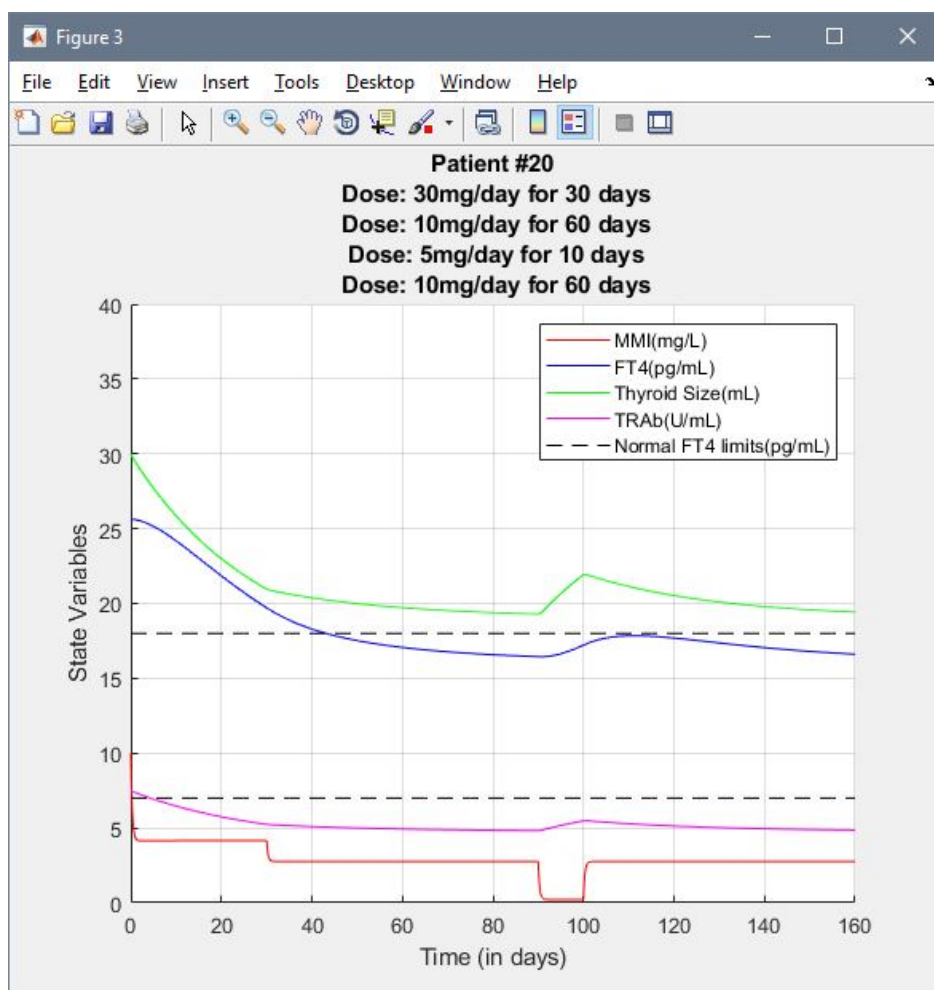
Rys. 5.8: Okno wyników symulacji.

branego pacjenta, nie uwzględniając leczenia.





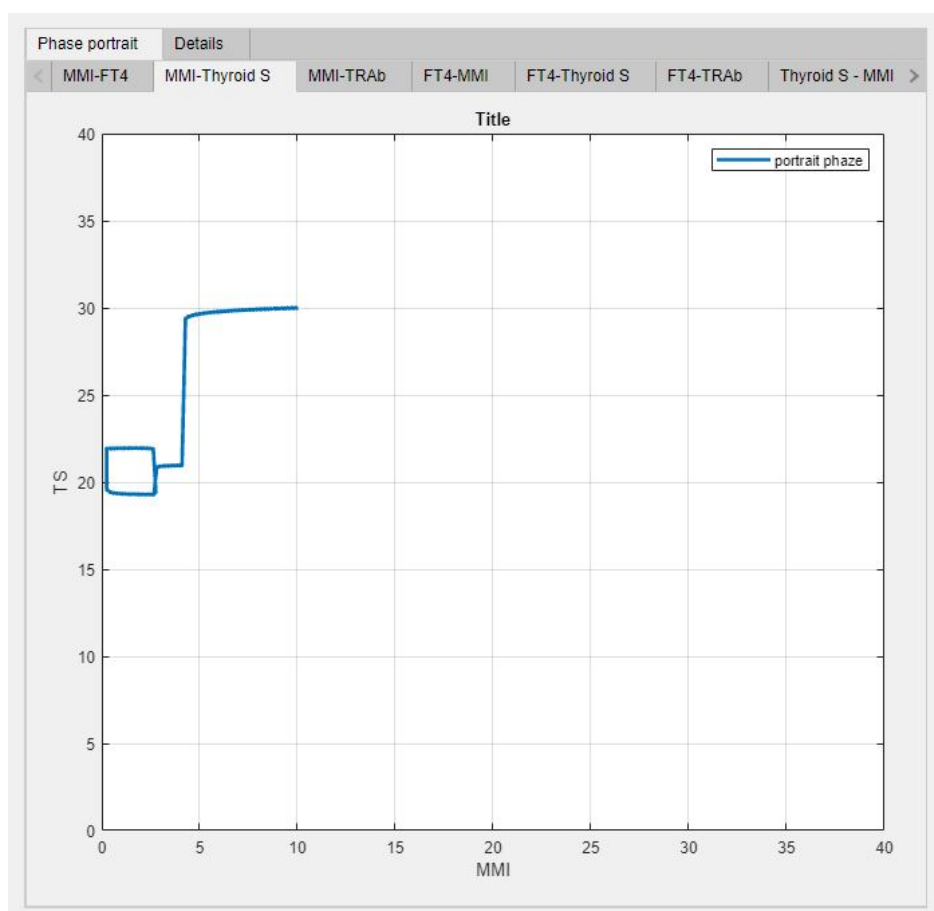
Rys. 5.9: Przedstawienie symulacji w czasie.



Rys. 5.10: Narzędzie edycji wykresów.

Patient #31 MMI 13.3333 FT4 26.43 TS 30 TRAb 1.74 Dose [40 30 20 10] Days [90 120 150 180] .png  
 Patient #31 MMI 13.3333 FT4 26.43 TS 30 TRAb 1.74 Dose [40 30 20 10] Days [90 120 120 180] .png  
 Patient #20 MMI 10 FT4 25.63 TS 30 TRAb 7.5 Dose [30 20 15 5] Days [60 60 60 180] .png  
 Patient #70 MMI 10 FT4 35.4 TS 30 TRAb 8.8 Dose [30 20 15 5] Days [60 90 90 180] .png  
 Patient #55 MMI 10 FT4 27.01 TS 30 TRAb 6.22 Dose [30 20 15 5] Days [60 60 60 180] .png  
 Patient #31 MMI 10 FT4 26.43 TS 30 TRAb 1.74 Dose [30 15 5] Days [120 120 360] .png  
 Patient #20 MMI 10 FT4 25.63 TS 30 TRAb 7.5 Dose [30 15 5 30] Days [90 30 30 30] .png  
 ...

Rys. 5.11: Zapisane w katalogu wykresy wyników symulacji.



**Rys. 5.12:** Przykładowy portret fazowy symulacji.

Phase portrait

Details

Eigen Values	
	-0.0990
	-34.4710
	-0.0350
	-8.3333e+03

Simulation time

160

Dose

[30 10 5 10]

Days

[30 60 10 60]

Initial values

MMI

10

FT4

25.63

Thyroid size

30

TRAb

7.5

**Rys. 5.13:** Szczegóły symulacji oraz wartości własne układu.

## 6. Rezultaty

W oparciu o program napisany przez autora pracy, symulowano różne scenariusze terapii pacjentów. Do analizy modelu użyto danych 4 pacjentów (Rozdział. 3.6), zmagających się z nadczynnością tarczycy Gravesa—Basedowa. W tej części pracy zostały przedstawione symulacje leczenia chorych.

### 6.1 Wstępne porównanie pacjentów

Na wykresie (Rys. 6.1) porównano analizowanych pacjentów, ze względu na zmierzone wartości fT4 i TRAb. Badanie miało miejsce podczas pierwszej wizyty u lekarza.

Na najsilniejszą nadczynność tarczycy, według poziomu hormonu fT4, cierpi pacjent numer 70. Potwierdza to najwyższy poziom przeciwciał TRAb w jego krwi. Poziom fT4 pozostałych pacjentów jest zbliżony. Pacjent numer 30 ma znacząco niższą wartość przeciwciał. Jego organizm może być bardzo czuły na występowanie przeciwciał lub nadczynność jest spowodowana innym czynnikiem.

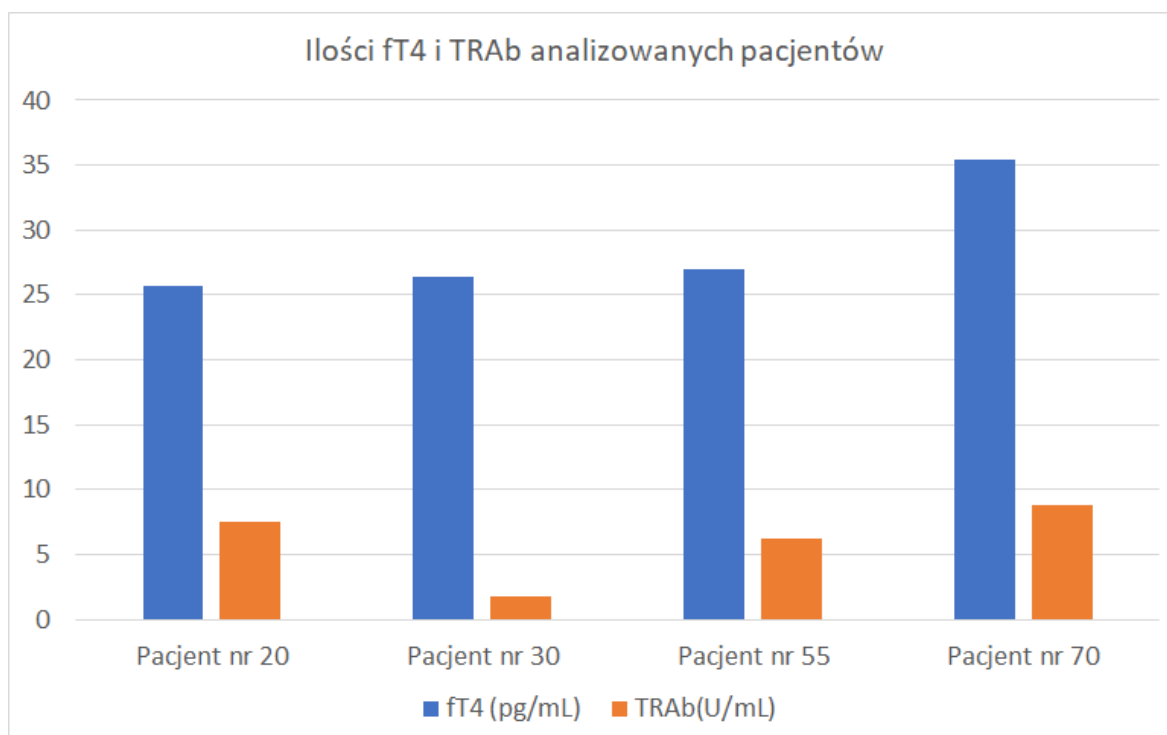
### 6.2 Pacjent numer 20

Na początku przeanalizowano stan pacjenta, bez podania leku. Poziom FT4 tego pacjenta wynosił 25,63 pg/ml, co jest znacznie powyżej normy (7-18 pg/ml). Dowodzi to faktu, iż pacjent ten cierpi na nadczynność tarczycy. Podczas symulacji trwającej 10 dni, żadne przebiegi czasowe nie ulegają zmianie. Można to zaobserwować na rysunku (Rys. 6.2). Dla nieskończonego długiego okresu, rezultaty są takie same. Wynika to z faktu, że przy braku terapii, model jest asymptotycznie stabilny.

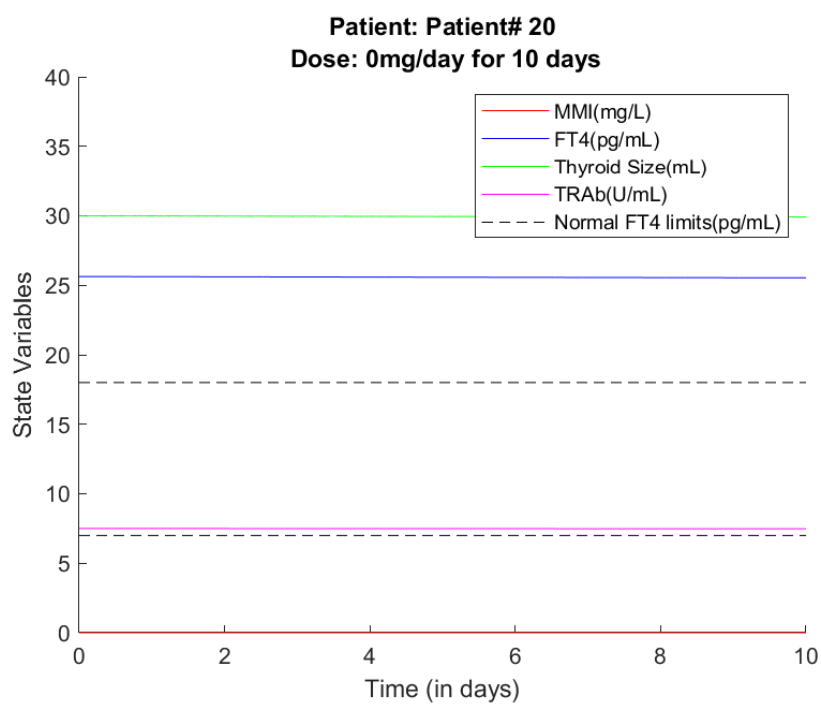
Po jednorazowym podaniu 30 mg MMI (Rys. 6.3), lek zostaje całkowicie wydalony przez organizm w czasie jednego dnia. Ta dawka nie ma znaczącego wpływu na funkcje tarczycy.

Przy podawaniu 30 mg leku przez 120 dni, stan gospodarki hormonalnej tarczycy pacjenta, znacząco się zmienił (Rys. 6.4). Po około 30 dniach, poziom FT4 pacjenta osiągnął graniczny stan dla osoby zdrowej. Kontynuowanie terapii przy tej samej dawce, skutkuje ciągłym obniżaniem się poziomu tego hormonu i po 90 dniach osiąga poziom świadczący o niedoczynności tarczycy.

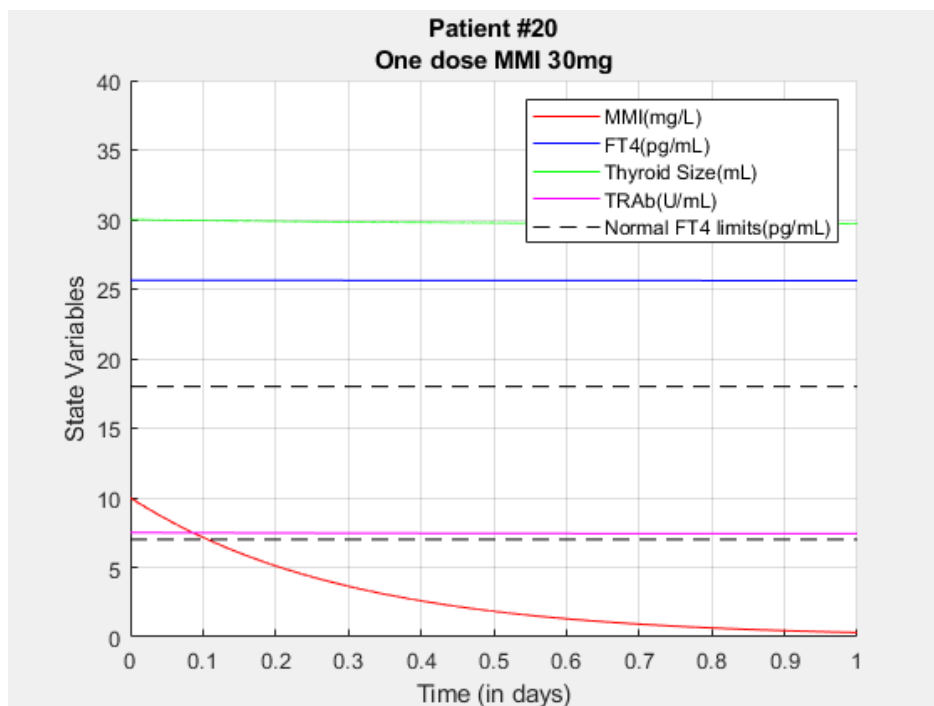
Jak pokazano na wykresie (Rys. 6.5) przy podawaniu dawki 30 mg przez 75 dni i następnie odstawieniu leku, pacjent powrócił do stanu nadczynności tarczycy. Trwało to około 35 dni. Taki scenariusz leczenia, okazał się nieskuteczny i pacjent wymaga następnej serii leczenia.



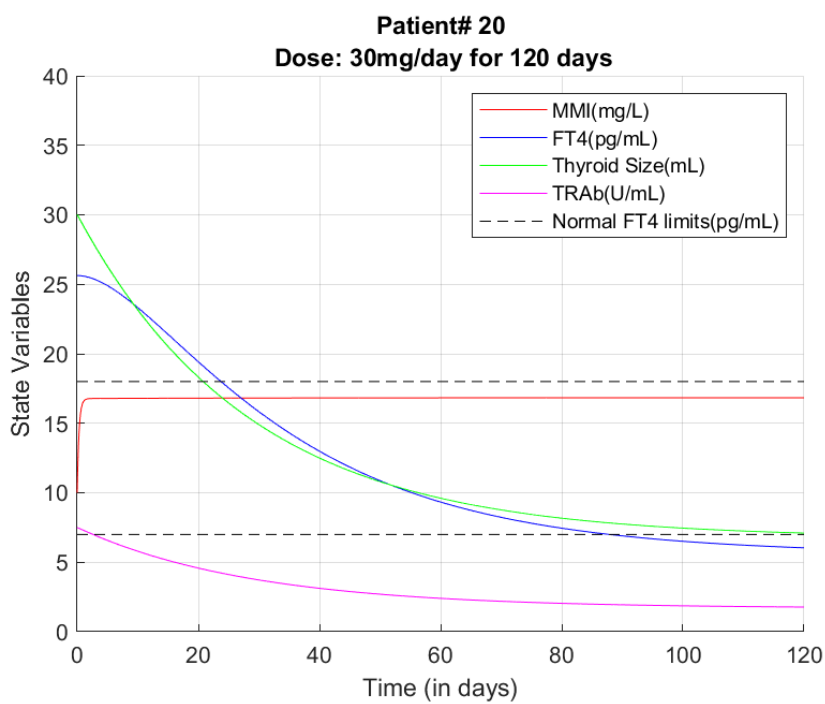
Rys. 6.1: Porównanie poziomów fT4 i TRAb analizowanych pacjentów.



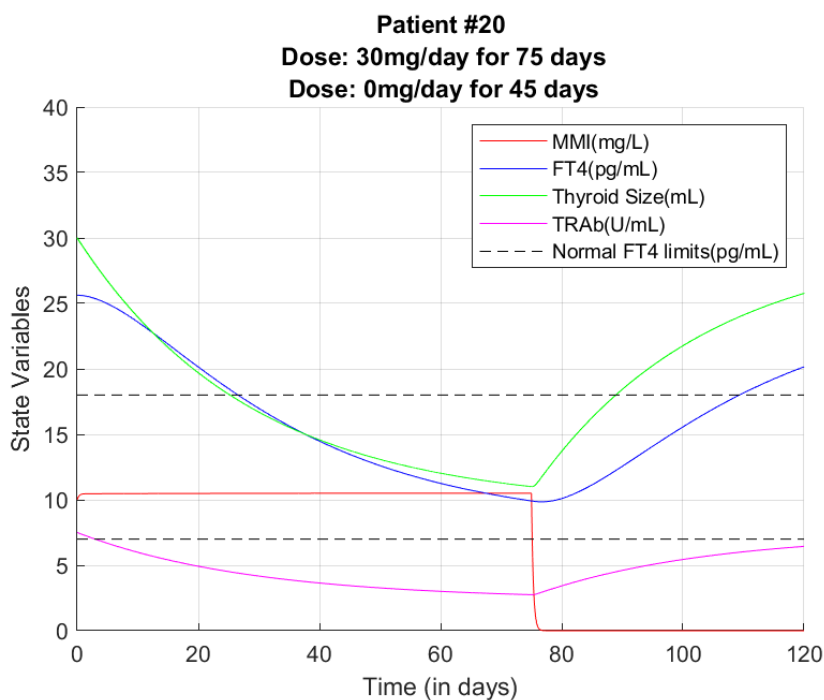
Rys. 6.2: Symulacja pacjenta nr 20 bez leczenia, trwająca 10 dni.



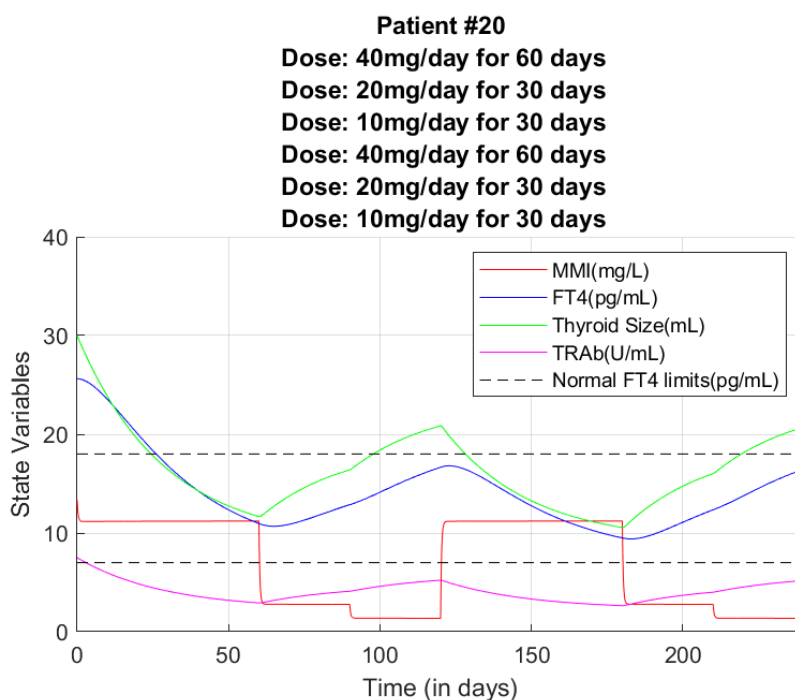
Rys. 6.3: Symulacja pacjenta nr 20, leczonego 30 mg leku, przez jeden dzień.



Rys. 6.4: Symulacja pacjenta nr 20, leczonego 30 mg leku, przez 120 dni.

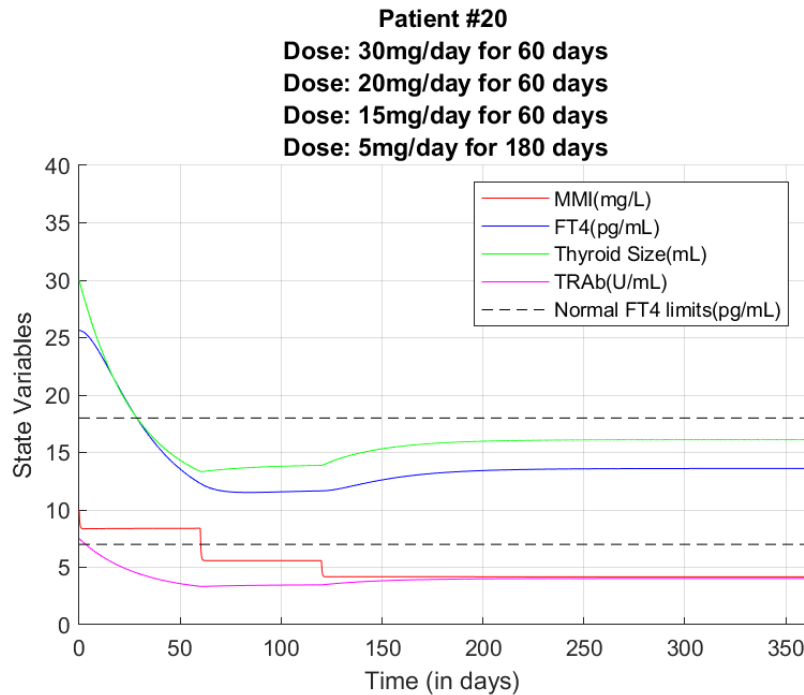


**Rys. 6.5:** Symulacja pacjenta nr 20 podczas leczenia i odstawienia leku.



**Rys. 6.6:** Symulacja pacjenta nr 20, przykładowa terapia, odstawienie i wznowienie terapii.



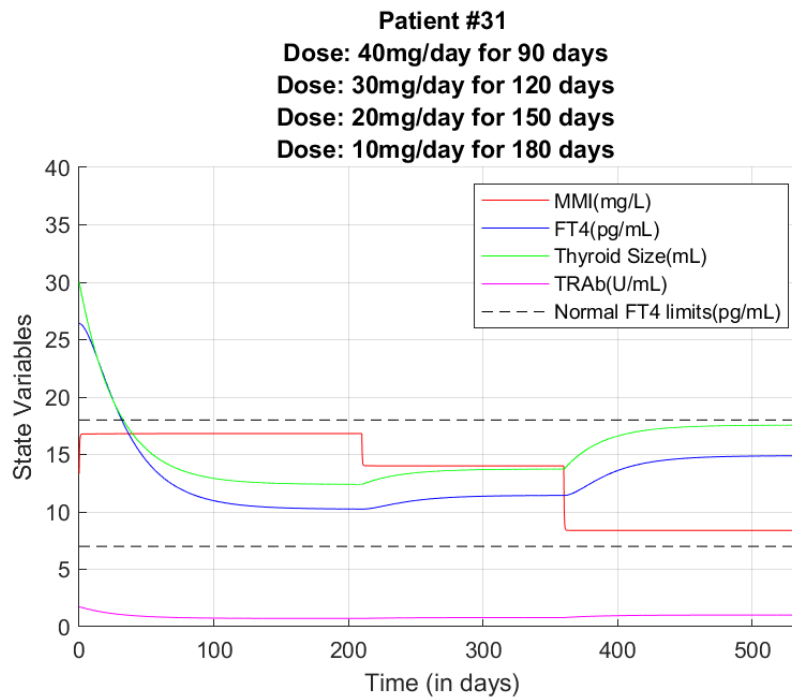


**Rys. 6.7:** Symulacja pacjenta nr 20, sugerowana 12-miesięczna terapia.

Rys. 6.6 przedstawia przykładową terapię dedykowaną dla pacjenta nr 20. Podczas leczenia dawką 30 mg metimazolu przez 2 miesiące, stężenie FT4 pacjenta osiągnęło górną graniczną wartość po 27 dniach. Po 60 dniach wynosiło 12,3 pg/mL, dlatego postanowiono zwiększyć dawkę metimazolu do 40 mg dziennie. Graniczna wartość została osiągnięta po 25 dniach, a stężenie pod koniec tego etapu terapii wyniosło 10,97 pg/mL. Następnie zmniejszono dawkę do 20 pg/mL i dalej do 10 pg/mL. Po tym okresie należy sprawdzić czy choroba jest w stadium reemisji. Jeśli tak, należy zacząć kolejny etap leczenia, stosując taką samą serię.

W artykule A. Prakash'a [2], opisane zostały różne stosowane metody leczenia choroby Gravesa. Niektóre z badań wskazują, że duże dawki metimazolu i krótka terapia zwiększają ryzyko wystąpienia nawrotów choroby. Optymalna długość terapii powinna wynosić 12-18 miesięcy. Przy 18-miesięcznej terapii, ryzyko nawrotu choroby to 37%. 6-miesięczna terapia wywoła nawrót u 58% leczonych.

Stosując się do zaleceń zawartych w artykule [2] skonstruowano sugerowaną terapię dla pacjenta nr 20 (Rys. 6.7). Podczas 12 miesięcy co 2 miesiące dawka leku jest zmniejszana. Podawane są dawki 30, 20, 15 i 5 mg MMI. Dawka utrzymująca leczenie wynosi 5 mg i jest podawana przez ostatnie 6 miesięcy terapii. FT4 człowieka zdrowego osiąga po 27 dniach leczenia.



Rys. 6.8: Symulacja pacjent nr 31, sugerowana 18-miesięczna terapia.

### 6.3 Pacjent numer 31

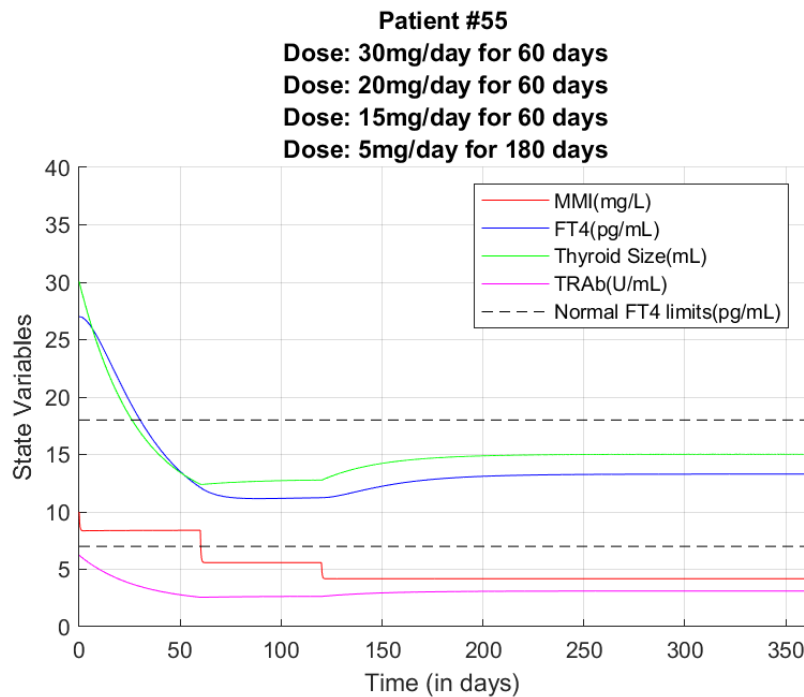
Pacjent numer 31 jest odmiennym przypadkiem. Jego poziom przeciwciał jest niski w odniesieniu do innych pacjentów, przy podobnym stężeniu fT4. Symulacje wykazały, że jest mało wrażliwy na leczenie metimazolem. Dla tego pacjenta, warto rozpatrywać alternatywne metody leczenia. Sugerowane leczenie obejmuje większe dawki leku (Rys. 6.8). Trwa ono 18 miesięcy, przy czym ostatnie 6 miesięcy, pacjent pobiera dawkę 10 mg MMI.

### 6.4 Pacjent numer 55

Rys. 6.9 przedstawia sugerowaną terapię dla pacjenta numer 55. Zastosowano to samo leczenie, co w przypadku pacjenta nr 20 (Rys. 6.6). Podczas 12 miesięcy co 2 miesiące dawka leku jest zmniejszana. Podawane są dawki 30, 20, 15 i 5 mg MMI. Dawka utrzymująca leczenie wynosi 5 mg i jest podawana przez ostatnie 6 miesięcy terapii. Pacjent osiąga poziom fT4 odpowiadający górnej granicy fT4 dla osoby zdrowej po 29 dniach.

### 6.5 Pacjent numer 70

Pacjent nr 70 ma najwyższy początkowy poziom fT4. Proponowana terapia trwa 14 miesięcy (Rys. 6.10). Jako, że jego poziom fT4 koreluje z wysokim poziomem TRAb, cho-

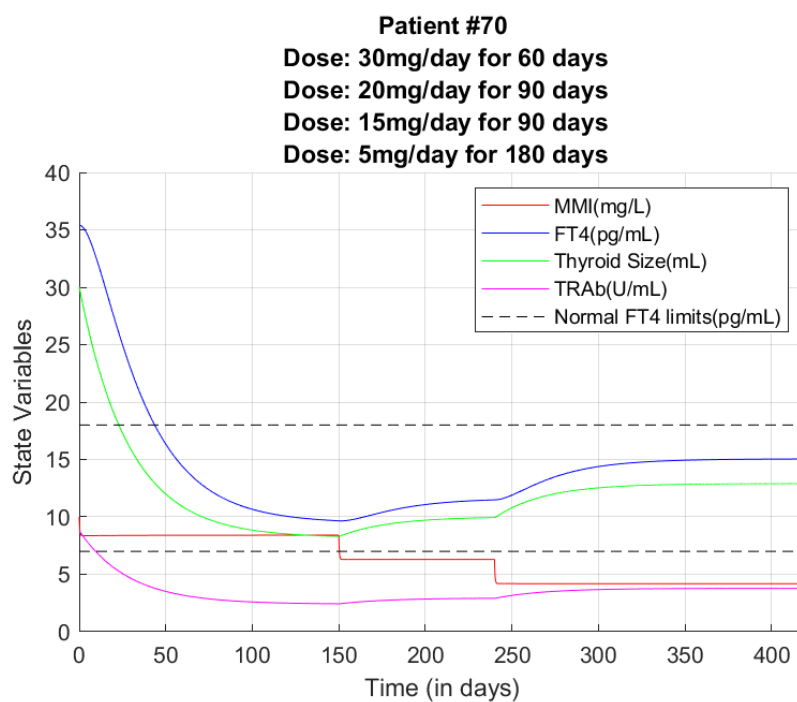


**Rys. 6.9:** Symulacja pacjenta nr 55, sugerowana 12-miesięczna terapia.

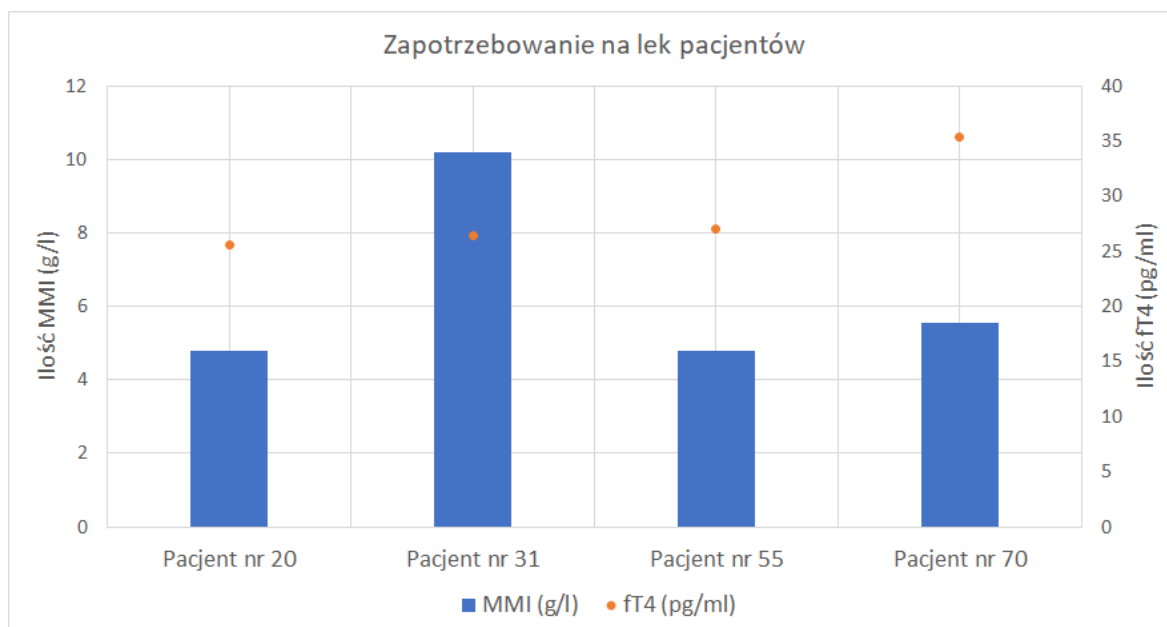
ry dobrze reaguje na leczenie. Przez pierwsze 2 miesiące stosujemy dawkę 30 mg/dzienne. Następnie zmniejszamy dawkę do 20 i 15 mg, co 3 miesiące. Jako dawkę utrzymującą terapię podajemy 5 mg leku przez 6 miesięcy. Pacjent osiąga poziom fT4 odpowiadający górnej granicy fT4 dla osoby zdrowej po 42 dniach.

## 6.6 Porównanie zapotrzebowania na lek

Przeanalizowano zapotrzebowanie na lek omawianych w pracy pacjentów. Zsumowano ilość przyjętego leku, podczas sugerowanego leczenia, przez okres pierwszych 360 dni. Dla pacjentów nr 20, 31 jest to koniec terapii. Wyniki przedstawione zostały na wykresie (Rys. 6.11). 3/4 pacjentów przyjmie około 5g leku przez 12 miesięcy. Pacjent numer 31 musi przyjąć 10g leku przez 12 miesięcy oraz będzie kontynuował leczenie przez 6 miesięcy.



**Rys. 6.10:** Symulacja pacjenta nr 70, sugerowana 14-miesięczna terapia.



**Rys. 6.11:** Porównanie zapotrzebowania na lek pacjentów.

# 7. Podsumowanie

## 7.1 Wnioski

- Model pozwala symulować terapie, jednak wyznaczenie parametrów  $k_5$ ,  $k_6$  polega na minimalizacji błędu średniokwadratowego względem poprzednich terapii pacjenta 3.4. W związku z tym, niemożliwe jest stosowanie symulacji, dla pacjentów podczas ich pierwszej wizyty, a ilość wcześniejszych terapii zwiększa dokładność modelu.
- Ponieważ parametry  $k_5$  i  $k_6$  są symulowane, modelu nie można zastosować we wspomaganiu terapii pacjenta, gdyż indywidualność ich wyznaczania jest czasochłonna i korzysta z danych konkretnego pacjenta z poprzednich terapii. Jednak, jeśli wyznaczymy te parametry, model powinien znacząco podnieść efektywność terapii, poprzez dobranie optymalnej ścieżki leczenia, dawek oraz pozwolić efektywnie zaplanować kolejne wizyty, zmniejszając tym samym ilość badań oraz orzekać o reemisji lub wyleczeniu z większym prawdopodobieństwem 6.
- W porównaniu do modelu skonstruowanego przez Langensteinam [4] model zastosowany w pracy Pandiyan [3], który bazuje na pracy poprzednika, pozwala obserwować przebieg czasowy metimazolu w krwi. Wprowadza to wiele niedomówień oraz symulacje, które dotyczą różnych długości terapii nie są zbieżne. Nieintuicyjnym lub niemożliwym jest też wyznaczenie prawdopodobieństwa reemisji, dla symulowanej terapii.
- Symulacja przebiegów czasowych nie jest czynnikiem, który bezpośrednio wpływa na efektywność terapii pacjenta. Ważniejszym jest wyznaczenie prawdopodobieństwa reemisji względem terapii. W leczeniu choroby Gravesa, dobór właściwych dawek i oscylacja między prawidłowymi poziomami fT4 może pozytywnie wpływać na całkowite wyleczenie, jednak hipoteza ta musi zostać przebadana w przyszłości.
- Symulacja przebiegów czasowych pozwala na właściwy dobór dawek leczenia, sprawiając, że gospodarka hormonalna układu tarczycowego będzie funkcjonowała tak, jak u człowieka zdrowego 6. Znacząco zmniejsza się ryzyko przedawkowania leku, które może doprowadzić do niedoczynności tarczycy lub zwiększenia efektów ubocznych przyjmowania metimazolu. Wpływa na zdrowie i komfort życia pacjenta.

- Optymalizacja kodu, poprzez stosowanie właściwych metod, może znacząco zwiększyć wydajność aplikacji i zmniejszyć zużycie zasobów. Zastosowanie przeciążenia metody, pozwoliło zmniejszyć zapotrzebowanie na pamięć RAM czterokrotnie i znacząco skróciło obliczenia [4.4](#). Pozwoliło to na wykonanie większej liczby symulacji.

# Bibliografia

- [1] Math. graphics. programming. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. [Online; dostęp 20.12.2018].
- [2] A. PRAKASH, A. S. Current and emerging treatment options for graves' hyperthyroidism. *Dove Medical Press Ltd.* (2010).
- [3] B. PANDIYAN, S. J. M. A patient-specific treatment model for graves' hyperthyroidism. *Theoretical Biology and Medical Modelling* (2018).
- [4] C. LANGENSTEIN, D. S. Relapse prediction in graves disease: Towards mathematical modeling of clinical, immune and genetic markers. *rev endocr metab disord. PubMed* (2016).
- [5] F. SINTUREL, A. G. Diurnal oscillations in liver mass and cell size accompany ribosome assembly cycles. *Cell* (2017).
- [6] MAJEWSKA, M. Przeciwciała przeciwgruczynkowe trab - normy i wyniki badania. <https://www.poradnikzdrowie.pl/sprawdz-sie/badania/przeciwciala-przeciwgruczynkowe-trab-normy-i-wyniki-badania-aa-cAaA-89ri-hwkg.html>, 2016. [Online; dostęp 19.16.2018].
- [7] PHARMA, A. Tapazole (methimazole). <https://www.rxlist.com/tapazole-drug.htm#medguide>, 2015. [Online; dostęp 07.01.2018].
- [8] STAFF, M. C. Graves' disease. <https://www.mayoclinic.org>, 2018. [Online; dostęp 02.01.2018].
- [9] WIKIPEDIA. *Tarczyca*. Wikimedia Foundation, 2018.
- [10] WIZU. Badanie ft4, co pozwala określić. <http://zdrowie.gazeta.pl/Zdrowie/7,101459,23027741,badanie-ft4-co-pozwala-okreslic.html>, 2018. [Online; dostęp 19.12.2018].