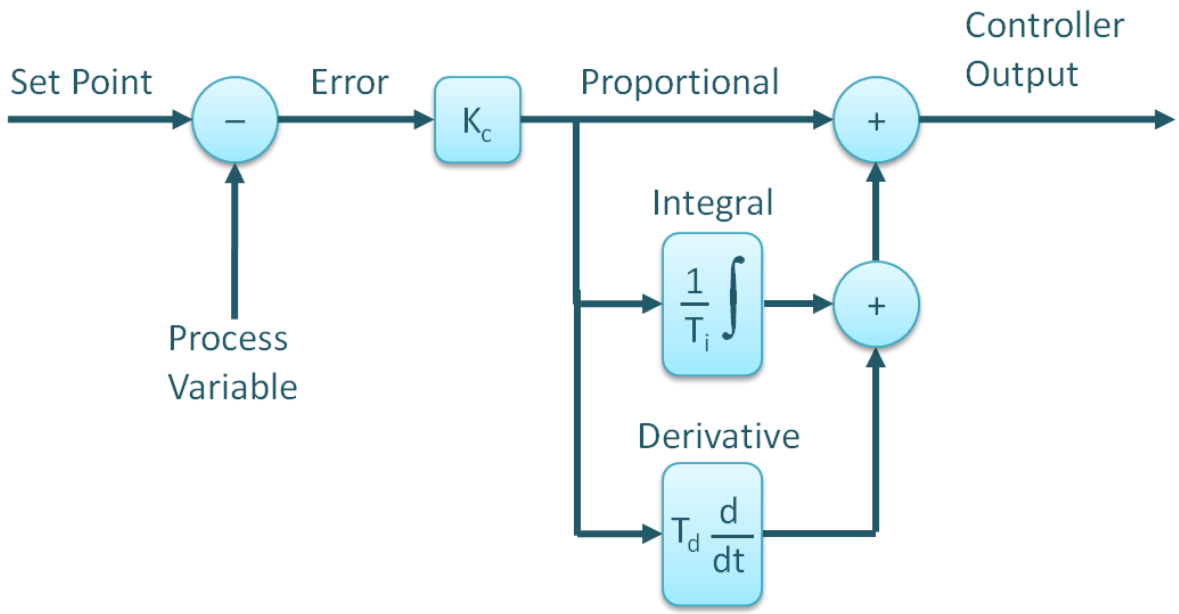
Implementacja regulatora PID:

Regulator PID składa się z trzech członów:

- Członu proporcjonalnego P o wzmocnieniu K(na rysunku oznaczone K_C),
- Członu całkującego I o czasie zdwojenia T_I,
- Członu różniczkowego D o czasie wyprzedzenia T_D

Rysunek poniżej przedstawia strukturę ciągłego w czasie regulatora PID.



Fot.: Struktura zastosowanego regulatora PID
Źródło: http://blog.opticontrols.com/archives/344

Taką konfigurację po przekształceniu do dziedziny czasu dyskretnego zastosowano w implementacji. Poszczególne oznaczenia na rysunku przekładają się na zmienne jak poniżej:

- Set Point → y_{ZAD} - wartość zadana
- Process Variable → y - wyjście obiektu
- Error → e - uchyb sterowania
- Proportional → u_P - składowa proporcjonalna sterowania
- Integral → u_I - składowa całkowa sterowania
- Derivative → u_D - składowa różniczkowa sterowania
- Controller Output → u - wyjście regulatora

Po przejściu do dziedziny czasu dyskretnego równanie wyjścia regulatora przedstawiono jako sumę trzech jego składowych, przedstawia się ono następująco:

$$u(k) = u_P(k) + u_I(k) + u_D(k)$$

Składowa $u_P(k)$ wyznaczana ze wzoru:

$$\mathrm{u_P(k)} = \mathrm{K\,e(k)}$$

Składowa $u_I(k)$ regulatora bez funkcjonalności anti wind-up wyznaczana ze wzoru:

$$\mathrm{u_I(k)} = \mathrm{u_I(k-1)} + \frac{K}{T_I}\mathrm{T_P}\,\frac{\mathrm{e(k-1)+e(k)}}{2}$$

Składowa $u_I(k)$ regulatora z funkcjonalnością anti wind-up wyznaczana ze wzoru:

$$\mathrm{u_I(k)} = \mathrm{u_I(k-1)} + \frac{K}{T_I}\,\mathrm{T_p}\,\frac{\mathrm{e(k-1)+e(k)}}{2} + \frac{\mathrm{T_P}}{\mathrm{T_V}}(\mathrm{u_w\,(k-1) - u(k-1)})$$

Składowa $u_D(k)$ wyznaczana ze wzoru:

$$\mathrm{u_D(k)} = \mathrm{K\,T_D}\,\frac{\mathrm{e(k) - e(k-1)}}{T_P}$$

Gdzie:

$$T_P - Okres\ próbkowania,$$
$$K - Wzmocnienie\ członu\ proporcjonalnego\ P,$$
$$T_I - Czas\ zdwojenia\ członu\ całkującego\ I,$$
$$T_D - Czas\ wyprzedzenia\ członu\ różniczkowego\ D$$
$$T_V - Parametr\ anti\ wind - up,$$
$$e(k) - uchyb\ sterowania\ w\ chwili\ k$$

Plik nagłówkowy PID.h deklaruje bibliotekę zawierającą:

- Strukturę zawierającą parametry regulatora
- Funkcję PID_init() inicjującą strukturę regulatora
- Funkcję PID_get_control() wyznaczającą nową wartość sterowania

Więcej informacji zawarto w komentarzach w listingu kodu na limonkowym tle poniżej.

```
#ifndef PID_H
#define PID_H

/*
* Plik:         PID.h
* Opis:         Biblioteka implementująca regulator PID z
*               funkcjonalnością anti wind-up
*/

#include <inttypes.h>

typedef struct
{
    float Tp;           // okres próbkowania
    float K;            // wzmocnienie członu P
    float Ti;           // czas zdwojenia członu I
    float Td;           // czas wyprzedzenia członu D
    float Tv;           // parametr anti wind-up;
//                      // nieaktywny jeśli mniejszy od zera

    float u_i_past;     // poprzednia wartość składowej całkowania I
    float u_w_past;     // poprzednia wartość sterowania
//                      // przekazanego do obiektu

    float u_past;       // poprzednia wartość sterowania regulatora PID
    float e_past;       // poprzedni uchyb sterowania
}PID_type;


/*
*   Inicjacja struktury regulatora PID funkcjonalnością z anti wind-up
*   pid         -    wskaźnik na strukturę PID
*   _PID_Tp     -    okres próbkowania
*   _PID_K      -    wzmocnienie członu proporcjonalnego P
*   _PID_Ti     -    parametr członu całkującego I
*   _PID_Td     -    parametr członu różniczkowego D
*   _PID_Tv     -    parametr anti wind-up;
*                    nieaktywny jeśli mniejszy od zera
*/
void PID_init(PID_type*, float, float, float, float, float );

/*
*   Wyznaczenie nowej wartości sterowania regulatora PID
*   pid     -   wskaźnik na strukturę regulatora
*   e       -   uchyb regulacji
*   u_max   -   maksymalna wartość sterowania
*   u_min   -   minimalna wartość sterowania
*/
float PID_get_control(PID_type*, float, float, float);



#endif
```

Plik źródłowy PID.c definiuje funkcje biblioteki regulatora PID:

- PID_init()
- PID_get_control()

Dokładne opisy funkcji zawarte w listingu kodu na limonkowym tle.

```
#include "PID.h"

/*
* Plik:         PID.c
* Opis:         Biblioteka implementuąca regulator PID z
*                funkcjonalnością anti wind-up
*/


/*
*   Inicjacja struktury regulatora PID funkcjonalnością z anti wind-up
*   pid         -    wskaźnik na strukturę PID
*   _PID_Tp     -    okres próbkowania
*   _PID_K      -    wzmocnienie członu proporcjonalnego P
*   _PID_Ti     -    czas zdwojenia członu całkującego I
*   _PID_Td     -    czas wyprzedzenia członu różniczkowego D
*   _PID_Tv     -    parametr anti wind-up;
*                     nieaktywny jeśli mniejszy od zera
*/
void PID_init(PID_type* pid, float _PID_Tp, float _PID_K, float _PID_Ti,
float _PID_Td, float _PID_Tv)
{
    pid->Tp = _PID_Tp;
    pid->K = _PID_K;
    pid->Ti = _PID_Ti;
    pid->Td = _PID_Td;
    pid->Tv = _PID_Tv;

    pid->u_i_past = 0.0;
    pid->u_w_past = 0.0;
    pid->u_past = 0.0;
    pid->e_past = 0.0;
}
```

Funkcja PID_get_control() implementuje regulator PID wedle wzorów podanych na początku tej sekcji.

```
/*
*   Wyznaczenie nowej wartości sterowania regulatora PID
*   pid     -   wskaźnik na strukturę regulatora
*   e       -   uchyb regulacji
*   u_max   -   maksymalna wartość sterowania
*   u_min   -   minimalna wartość sterowania
*/
float PID_get_control(PID_type* pid, float e, float u_max, float u_min)
{
    float u_p = 0; // skladowa sterowania od P
    float u_i = 0; // skladowa sterowania od I
    float u_d = 0; // skladowa sterowania od D

    // Źródło poniższych wzorów: wzory (2) ze skryptu
    // składowa P równa iloczynowi wzmocnienia K i uchybu sterowania
    u_p = pid->K * e;

    // składowa I powiększana co krok o  K*Tp*(e_past+e)/2/Ti
    u_i = pid->u_i_past + pid->K*pid->Tp*(pid->e_past + e)/2/pid->Ti;

    // anti wind-up, aktywny jeśli Tv>0;
    // składowa I powiększana dodatkowo co krok o Tp*(u_w_past-u_past)/Tv
    // Źródło: wzór ze skryptu, str. 87
    if( pid->Tv > 0.0 )
        u_i += pid->Tp*(pid->u_w_past - pid->u_past)/pid->Tv;

    // składowa D równa K*Td*(e-e_past)/Tp
    u_d = pid->K*pid->Td*(e - pid->e_past)/pid->Tp;

    // wartość sterowania równa sumie składowych;
    // Źródło: wzór (1) ze skryptu
    pid->u_past = u_p + u_i + u_d;

    pid->u_w_past = pid->u_past;
    // nałożenie ograniczeń sterowanie
    if( pid->u_w_past > u_max )
        pid->u_w_past = u_max;
    if( pid->u_w_past < u_min )
        pid->u_w_past= u_min;
    // u_w_past jest ograniczonym u_past -
    // u_w_past to sterowanie przekazane do obiektu

    pid->u_i_past = u_i;
    pid->e_past = e;

    return ( pid->u_w_past );
}
```

Plik konfiguracyjny PID_data.h pojedynczego regulatora zawiera parametry takie jak:

- Okres próbkowania
- Parametr anti wind-up
- Wzmocnienie krytyczne i odpowiadający mu okres oscylacji wyznaczone metodą Zieglera-Nicholsa
- Pierwszy wariant nastaw regulatora PID wg. tabelki Zieglera-Nicholsa
- Drugi wariant nastaw regulatora PID dobranych metodą inżynierską

Plik ten załączany jest przykładowo do pliku main.c

```
#ifndef PID_DATA_H
#define PID_DATA_H

#include <inttypes.h>

//Parametry regulatora PID

// okres próbkowania
#define PID_Tp (1/20.0)
// parametr anti-winding
#define PID_Tv -8.0f

//////////////////////////////////////////////////////////////
//parametry regulatora PID wyznaczone metodą Zieglera-Nicholsa
// Wzmocnienie krytyczne
#define PID_Kk 30.0f
// Okres oscylacji
#define PID_Tu (8*PID_Tp)

#define PID_K (0.6*PID_Kk)
#define PID_Ti (0.5*PID_Tu)
#define PID_Td (0.12*PID_Tu)
//////////////////////////////////////////////////////////////

//////////////////////////////////////////////////////////////
//parametry regulatora PID wyznaczone metodą inżynierską
/*
#define PID_K 15.00f
#define PID_Ti 3.5f
#define PID_Td 0.040f
*/
//////////////////////////////////////////////////////////////


#endif
```

Implementacja regulatora DMC:

Algorytm DMC jest jednym z najpopularniejszych algorytmów regulacji predykcyjnej
W poniższym opisie założono, że czytelnikowi znane jest zagadnienie regulacji predykcyjnej zrealizowanej na przykładzie regulatora DMC, toteż pominięto opis teoretyczny, co pozwala przejść bezpośrednio do przydatnych w implementacji równań.

Poszczególne macierze tworzone są na podstawie wektora s odpowiedzi skokowej obiektu:

- Macierz współczynników odpowiedzi skokowej M:

$$M = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \cdots & 0 \\ s_2 & s_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N & s_{N-1} & \dots & s_{N-N_u+1} \end{bmatrix}_{NxN_U}$$

- Macierz służąca do wyznaczenia trajektorii swobodnej Yo(k) - M^P:

$$M^P = \begin{bmatrix} s_2 - s_1 & s_3 - s_2 & \cdots & s_D - s_{D-1} \\ s_3 - s_1 & s_4 - s_2 & \dots & s_{D+1} - s_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N+1} - s_1 & s_{N+2} - s_2 & \dots & s_{N+D-1} - s_{D-1} \end{bmatrix}_{Nx(D-1)}$$

Pozostałe macierze:

- Wektor przeszłych zmian sterowania ΔU^P:

$$\Delta U^P(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \vdots \\ \Delta u(k-(D-1)) \end{bmatrix}_{(D-1)x1}$$

- Macierz współczynników zmian sterowania K:

$$K = [M^T M + \lambda I]^{-1} M^T = \begin{bmatrix} \overline{K}_1 \\ \overline{K}_2 \\ \vdots \\ \overline{K}_{N_U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & \cdots & K_{1,N} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & \dots & K_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N_U,1} & K_{N_U,2} & \dots & K_{N_U,N} \end{bmatrix}_{N_u x N}$$

Aby móc wyznaczać kolejne wartości sterowania potrzebne są następujące przekształcenia:

$$\begin{aligned} u(k|k) = u(k-1) + \Delta u(k|k) = \; & u(k-1) + \overline{K}_1[Y^{ZAD}(k) - Y^0(k)] \\ & = u(k-1) + \overline{K}_1[Y^{ZAD}(k) - Y(k) - M^P \Delta U^P(k)] \\ & = u(k-1) + \overline{K}_1[Y^{ZAD}(k) - Y(k)] - \overline{K}_1 M^P \Delta U^P(k) \\ & = u(k-1) + \sum_{\iota=1}^{N} K_{1,\iota}(y^{ZAD}(k) - y(k)) - \overline{K}_1 M^P \Delta U^P(k) \end{aligned}$$

Po podstawieniu:

$$e(k) = \; y^{ZAD}(k) - y(k),$$

$$K_e = \sum_{\iota=1}^{N} K_{1,\iota},$$

$$K_U = \overline{K}_1 M^P$$

otrzymano równanie:

$$u(k|k) = u(k-1) + K_e e(k) - K_u \Delta U^P(k)$$

Po uwzględnieniu ograniczeń wartości sterowania otrzymujemy finalnie:

$$u(k) = \ u(k|k) = u(k-1) + K_e e(k) - K_u \Delta U^P(k)$$

Gdzie:

K_e to suma pierwszego wiersza macierzy K,

$K_u$to iloczyn pierwszego wiersza macierzy K i M^P

Taka postać równania przy wykorzystaniu biblioteki obsługującej operacje na wektorach pozwala na implementację regulatora DMC w języku C.

Plik nagłówkowy DMC.h deklaruje bibliotekę zawierającą:

- Strukturę parametrów regulatora DMC_type
- Funkcję DMC_init() inicjującą strukturę
- Funkcję DMC_get_control() wyznaczającą kolejne wartości sterowania

Więcej informacji zawarto w komentarzach w listingu kodu na limonkowym tle poniżej.

```
#ifndef DMC_H
#define DMC_H

/*
* Plik:         DMC.h
* Opis:         Biblioteka implementująca regulator DMC.
*               Parametry regulatora wyznaczane przy pomocy dedykowanych
*               skryptów Matlaba.
*               Do wyznaczenia parametrów wymagana jest znana odpowiedź
*               skokowa.
*               Skrypty: "DMC_init.m", "DMC_script.m", "exporter.m"
*/

#include <inttypes.h>

typedef struct
{
    uint8_t D;              // długość horyzontu dynamiki
    float Ke;               // suma pierwszego wiersza macierzy K
    float * Ku;             // iloczyn macierzowy pierwszego wiersza K i Mp
    float * delta_u_past;   // wektor przeszłych zmian sterowania
    float u;                // wartość sterowania
}DMC_type;


/*
*   Inicjacja struktury regulatora DMC
*   dmc         - wskaźnik na strukturę regulatora
*   _D          - długość horyzontu dynamiki
*   _Ke         - suma pierwszego wiersza macierzy K
*   _Ku         - iloczyn macierzowy pierwszego wiersza K i Mp
*   u_initial   - początkowa wartość wyjścia regulatora DMC
*/
void DMC_init(DMC_type*, uint8_t, float, float*, float);

/*
*   Wyznaczenie nowej wartości sterowania
*   dmc         - wskaźnik na strukturę regulatora
*   e           - bieżący uchyb sterowania
*   u_max       - maksymalna wartość sterowania
*   u_min       - minimalna wartość sterowania
*/
float DMC_get_control(DMC_type*, float, float, float);


#endif
```

Plik źródłowy DMC.c definiuje funkcje biblioteczne regulatora DMC:

- DMC_init()
- DMC_get_control()

Dokładne opisy funkcji zawarte w listingu kodu na limonkowym tle.

```
#include "mat_lib.h"
#include "DMC.h"
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

/*
* Plik:         DMC.c
* Opis:         Biblioteka implementująca regulator DMC.
*               Parametry regulatora wyznaczane przy
*               pomocy dedykowanych skryptów Matlaba.
*               Do wyznaczenia parametrów wymagana jest
*               znana odpowiedź skokowa.
*               Skrypty: "DMC_init.m", "DMC_script.m", "exporter.m"
*/


/*
*   Inicjacja struktury regulatora DMC
*   dmc         - wskaźnik na strukturę regulatora
*   _D          - długość horyzontu dynamiki
*   _Ke         - suma pierwszego wiersza macierzy K
*   _Ku         - iloczyn macierzowy pierwszego wiersza K i Mp
*   u_initial   - początkowa wartość wyjścia regulatora DMC
*/
void DMC_init(DMC_type* dmc, uint8_t _D, float _Ke, float* _Ku, float
u_initial)
{
    uint8_t n=0;

    dmc->D = _D;
    dmc->Ke = _Ke;

    // alokacja pamięci dla wektora współczynników regulatora DMC
    dmc->Ku = malloc(sizeof(float)*(dmc->D-1));

    // alokacja pamięci dla wektora przeszłych zmian sterowania
    dmc->delta_u_past = malloc(sizeof(float)*(dmc->D-1));

    dmc->u = u_initial;

    // przekopiowanie wektora do zaalokowanego obszaru pamięci
    memcpy(dmc->Ku, _Ku, sizeof(float)*(dmc->D-1) );

    // wyzerowanie poprzednich wartosci zmian sterowawnia
    for(n=0;n<(dmc->D-1);n++)
        dmc->delta_u_past[n] = 0.0;
}
```

Funkcja DMC_get_control() implementuje regulator DMC oparty na wzorach podanych na początku tej sekcji.

```
/*
*   Wyznaczenie nowej wartości sterowania
*   dmc         - wskaźnik na strukturę regulatora
*   e           - bieżący uchyb sterowania
*   u_max       - maksymalna wartość sterowania
*   u_min       - minimalna wartość sterowania
*/
float DMC_get_control(DMC_type* dmc, float e, float u_max, float u_min)
{
    float delta_u;
    float tmp;
    float * new_delta_u_past;
    new_delta_u_past = malloc(sizeof(float)*(dmc->D-1));

    // Równanie regulatora DMC
    // u(k) = u(k-1) + Ke*e(k) - Ku*deltaUp(k)
    // Źródło: wzór u(k|k), str. 90 skryptu do projektu 1 SMS

    // iloczyn wektorów współczynników Ku i
    // przeszłych zmian sterowania delta_u_past
    mat_mul(dmc->Ku, 1, dmc->D-1, dmc->delta_u_past, dmc->D-1, 1, &tmp);

    // wyznaczenie nowej zmiany sterowania
    delta_u = dmc->Ke*e - tmp;
    // wyznaczenie nowej wartości sterowania
    tmp = dmc->u + delta_u;

    // nałożenie ograniczeń na sterowanie
    if(tmp >  u_max)
        tmp =  u_max;
    else if(tmp < u_min)
        tmp = u_min;

    // przekazanie do regulatora ograniczonej zmiany sterowania
    delta_u = tmp - dmc->u;
    dmc->u = tmp;

    // przesunięcie wektora przeszłych zmian sterowania o
    // jeden krok w tył i
    // wstawienie bieżącej zmiany sterowania na początek
    mat_move_down(dmc->delta_u_past, dmc->D-1, 1, delta_u,
new_delta_u_past);

    // zastąpienie przeszłego wektora nowym
    free(dmc->delta_u_past);
    dmc->delta_u_past = new_delta_u_past;

    return dmc->u;
}
```

Wektory wykorzystywane w implementacji regulatora DMC wyznaczono przy pomocy poniższych skryptów Matlaba.

Skrypt DMC_script.m:

- ładuje do środowiska wyznaczony wcześniej znormalizowany wektor odpowiedzi skokowej,
- definiuje zmienne określające parametry regulatora (D, N, Nu, lambda),
- wywołuje skrypt DMC_init.m wyznaczający macierze regulatora DMC,
- wylicza wektor Ku oraz skalar Ke,
- finalnie wywołuje skrypt exporter.m generujący plik nagłówkowy DMC_data.h załączany do projektu

```
% Plik:          DMC_script.m
% Opis:          Skrypt wyliczający parametry regulatora DMC
%                przeznaczonego do uruchomienia w systemie wbudowanym

% Załadowanie odpowiedzi skokowej obiektu
load('s_D44.mat')

% Założone parametry regulatora
D = length(s);      % horyzont dynamiki
N=5;                % horyzont predykcji
Nu=1;               % horyzont sterowania
lambda = 0.1        % kara za zmienność sterowania
run('DMC_init.m');

Ke = sum(K(1,:));
Ku = K(1,:)*Mp;

% wyeksportowanie wyznaczonych parametrów do
%pliku nagłówkowego zgodnego ze standardem języka C
run('exporter.m');
```

Skrypt DMC_init.m wyznacza macierze M i Mp regulatora zgodnie ze wzorami podanymi na początku tej sekcji.

```
% Plik:         DMC_init.m
% Opis:         Skrypt wyliczajacy parametry regulatora DMC

% Wyznaczenie macierzy M
M = zeros(D,D);
for kNu=1:Nu
    M(kNu:N,kNu) = s(1:(N+1-kNu));
end

% Wyznaczenie macierzy Mp
Mp = ones(D,D-1)*s(end);
for kD=1:D-1
    Mp(1:(N-kD),kD) = s((kD+1):(N))';
end
Mp = Mp - ones(D,1)*s(1:end-1);

fi = eye(D);
LAMBDA = lambda*eye(D);
% Wyznaczenie macierzy K
K = inv((M')*M+LAMBDA)*(M');
```

Skrypt eksporter.m generuje plik nagłówkowy DMC_data.h zgodny ze standardem języka C. Umieszcza w pliku:

- Wartości horyzontów(informacyjnie) – typ uint8_t,
- Parametr lambda(informacyjnie) – typ float,
- Skalar Ke – typ float,
- Wektor Ku – tablica float

```
% Plik:         exporter.m
% Opis:         Skrypt eksportujący wyliczone parametry regulatora DMC do
%               postaci zgodnej ze standardem języka C

% powstanie plik "DMC_data.h" w folderze Inc
fileID = fopen('../../Inc/DMC_data.h','w');

fprintf(fileID,'#ifndef DMC_DATA_H\n#define DMC_DATA_H\n\n');
fprintf(fileID,'#include <inttypes.h>\n\n', D);

fprintf(fileID,'//Parametry regulatora DMC\n', D);
fprintf(fileID,'uint8_t DMC_D = %d;\n', D);
fprintf(fileID,'uint8_t DMC_N = %d;\n', N);
fprintf(fileID,'uint8_t DMC_Nu = %d;\n', Nu);
fprintf(fileID,'float DMC_lambda = %f;\n\n', lambda);

fprintf(fileID,'// Przeliczone wartosci do sterowania DMC\n', D);
fprintf(fileID,'float DMC_Ke = %f;\n\n', Ke);

fprintf(fileID,'float DMC_Ku[] =\n{\n');
fprintf(fileID,'    %f, \n',Ku)
fprintf(fileID,'};\n\n');


fprintf(fileID,'#endif\n');
fclose(fileID);
```

Przykładowy plik nagłówkowy DMC_data.h wygenerowany skryptem exporter.m dla horyzontów dynamiki równym 44, predykcji 5, a sterowania 1 oraz lambda równym 0.1 .

```
#ifndef DMC_DATA_H
#define DMC_DATA_H

#include <inttypes.h>

//Parametry regulatora DMC
uint8_t DMC_D = 44;
uint8_t DMC_N = 5;
uint8_t DMC_Nu = 1;
float DMC_lambda = 0.100000;

// Przeliczone wartosci do sterowania DMC
float DMC_Ke = 2.085205;

float DMC_Ku[] =
{
    1.135635,     1.675895,     1.893366,     1.883774,
    1.789106,     1.672334,     1.559733,     1.459643,
    1.347042,     1.238612,     1.126011,     1.025921,
    0.934172,     0.850764,     0.763185,     0.696458,
    0.633902,     0.571346,     0.517131,     0.458745,
    0.417041,     0.379507,     0.337803,     0.296099,
    0.262736,     0.237713,     0.212691,     0.187668,
    0.154305,     0.145964,     0.129283,     0.112601,
    0.100090,     0.083408,     0.079238,     0.062556,
    0.050045,     0.041704,     0.033363,     0.020852,
    0.020852,     0.016682,     0.016682,
};

#endif
```

Zastosowana implementacja regulatora DMC z wykorzystaniem skryptów Matlaba automatycznie generującymi plik z konfiguracją regulatora pozwala na sprawne wyznaczenie nastaw regulatora DMC spełniających założenia jakości regulacji.

Wykorzystanie bibliotek regulatorów PID i DMC sprowadza się do:

- zdefiniowania struktury DMC_type lub PID_type jako globalne,
- wywołania funkcji DMC_init() lub PID_init() ze stosownymi parametrami,
- cyklicznego wywoływania funkcji DMC_get_control() lub PID_get_control() ze stosownymi parametrami w celu sterowania obiektu

Poniżej skrócona implementacja bibliotek regulatorów.

```
* File Name          : main.c
* Description        : Main program body

. . .

#include "DMC_data.h"
#include "PID_data.h"
#include "DMC.h"
#include "PID.h"

. . .

// DMC structure
DMC_type dmc;
// PID structure
PID_type pid;

. . .

int main(void)
{
    . . .

    // inicjacja struktury regulatora DMC
    DMC_init(&dmc, DMC_D, DMC_Ke, DMC_Ku, y_zad);
    // inicjacja struktury regulatora PID
    PID_init(&pid, PID_Tp, PID_K, PID_Ti, PID_Td, PID_Tv);

    . . .

    while(1)
    {
        . . .
    }
}

. . .
```

```
void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
{
    . . .

    if(htim->Instance == TIM2) // TIM2 set to 20Hz
    {
        static float y = 0.0f;
        static float u = 0.0f;
        float e = 0;

        y = (input-2048.0f); // przejście z 0 - 4095 do -2048 - 2047
        e = y_zad-y;         // uchyb sterowania

        u = PID_get_control(&pid, e, 2047, -2048); // nowe sterowanie PID
        //u = DMC_get_control(&dmc, e, 2047, -2048); // nowe sterowanie DMC

        // ograniczenia sterowania
        if(u < -2048.0f) u = -2048.0f;
        if(u >  2047.0f) u =  2047.0f;

        output = u+2048.0f; // przejście z -2048 - 2047 do 0 - 4095

        updateControlSignalValue(output);

        // synteza danych przesyłanych do komputera
        sprintf(text, "U=%+8.2f;Y=%+8.2f;Yzad=%+8.2f;\n\r", u, y, y_zad);

        //BSP_LCD_DisplayStringAtLine(4, (uint8_t*)text);

        while(HAL_UART_GetState(&huart) == HAL_UART_STATE_BUSY_TX);
        if(HAL_UART_Transmit_IT(&huart, (uint8_t*)text, 40)!= HAL_OK)
        {
            Error_Handler();
        }
    }
    . . .
}

. . .
```