

[>

Приложение № 1. Файл Maple V с Аналитическим выводом выражений для законов управления в зоне регулирования.

[>

- Подключение используемых библиотек

```
[ > restart;  
[ > with(linalg):  
[ > with(plots):
```

[>

- Процедуры

- Установка начального значения в матрице A initprocA(a)

A --- матрица размерности $[m \times n]$, в её строки будет занесён вектор a, размерности $[n]$, таким образом, после вызова этой процедуры во всех строках i-го столбца матрицы A будет элемент L[i].

```
> InitprocA:=proc(L) local i, j, C; global n, m;  
> C:=matrix(m,n);  
> for i from 1 to m do for j from 1 to n do C[i,j]:=L[j]:  
od: od:  
> C;  
> end;
```

```
InitprocA := proc(L)
```

```
local i, j, C;
```

```
global n, m;
```

```
    C := linalg:-matrix(m, n);
```

```
    for i to m do for j to n do C[i, j] := L[j] end do end do;
```

```
    C
```

```
end proc
```

- Процедура поэлементного перемножения матриц MatrElProd(A, B);

Процедура перемножает матрицы A и B поэлементно. При этом матрицы должны иметь одинаковые размерности или одна или обе размерности матрицы A могут быть больше соответствующих размерностей матрицы B, при этом перемножаться будут только элементы с совпадающими индексами.

```
> MatrElProd:=proc(A, B) local i, j, C;  
> if (coldim(A)>=coldim(B) and rowdim(A)>=rowdim(B)) then  
>   C:=matrix(rowdim(A),coldim(A));  
>   for j from 1 to coldim(A) do  
>     for i from 1 to rowdim(A) do  
>       if (j<= coldim(B) and i <= rowdim(B)) then  
>         C[i,j]:=A[i,j]*B[i,j]; else C[i,j]:=A[i,j]; fi;
```

```

>     od;
>     od; C;
> else
> print(`Одна или обе размерности матрицы A меньше
> размерности матрицы B, что недопустимо`);
> fi;
> end;

```

MatrElProd := **proc**(A, B)

local i, j, C;

if *linalg:-coldim(B)* ≤ *linalg:-coldim(A)* **and**

linalg:-rowdim(B) ≤ *linalg:-rowdim(A)* **then**

C := *linalg:-matrix(linalg:-rowdim(A), linalg:-coldim(A))*;

for j **to** *linalg:-coldim(A)* **do** **for** i **to** *linalg:-rowdim(A)* **do**

if j ≤ *linalg:-coldim(B)* **and** i ≤ *linalg:-rowdim(B)* **then**

C[i, j] := A[i, j]*B[i, j]

else C[i, j] := A[i, j]

end if

end do

end do;

C

else print(`Одна или обе размерности матрицы A меньше размерности матрицы B, что недопустимо`)

end if

end proc



Процедура InitprocP()

Процедура выполняет присвоение начальных значений матрице P, содержащей числовые коэффициенты, появляющиеся перед t^{**n} от взятия производных.

```

> InitprocP:=proc() local B, i, j; global n,m;
> B:=matrix(m,n);
> for i from 1 to m do for j from 1 to n do B[i,j]:=1; od;
> od;
>     for j from 2 to m do
>         for i from 1 to n do
>             if (i-j<0) then
>                 B[j,i]:=0;
>             else
>                 B[j,i]:=B[j-1,i]*(i-j+1);
>             fi;
>         od;
>     od;

```

```
> od;  
> B;  
> end;
```

```
InitprocP := proc()
```

```
local B, i, j;
```

```
global n, m;
```

```
    B := linalg:-matrix(m, n);
```

```
    for i to m do for j to n do B[i, j] := 1 end do end do;
```

```
    for j from 2 to m do for i to n do
```

```
        if  $i - j < 0$  then B[j, i] := 0 else B[j, i] := B[j - 1, i]*(i - j + 1) end if
```

```
        end do
```

```
    end do;
```

```
    B
```

```
end proc
```

Процедура InitprocT(t)

[Процедура выполняет присвоение начальных значений матрице T

```
> InitprocT:=proc(t) local i, j, B; global m, n;
```

```
> B:=matrix(m,n);
```

```
>   for i from 1 to m do
```

```
>     for j from 1 to n do
```

```
>       if (j-i<0) then
```

```
>         B[i,j]:=0;
```

```
>       elif j-i>0 then
```

```
>         B[i,j]:= t^(j-i);
```

```
>       elif t<>0 then
```

```
>         B[i,j]:=1;
```

```
>       else
```

```
>         B[i,j]:=1;
```

```
>       fi;
```

```
>     od;
```

```
>   od;
```

```
> B;
```

```
> end;
```

```
InitprocT := proc(t)
```

```
local i, j, B;
```

```
global m, n;
```

```
    B := linalg:-matrix(m, n);
```

```
    for i to m do for j to n do
```

```
        if  $j - i < 0$  then B[i, j] := 0
```

```

        elif 0 < j - i then B[i, j] := t^(j - i)
        elif t ≠ 0 then B[i, j] := 1
        else B[i, j] := 1
        end if
    end do
end do;
B
end proc

```

— Процедура, сокращающая число переменных в массиве CalcPart2(A, B).

На выходе этой процедуры получится матрица A_1 , в столбцах $(m+1) \dots (2m)$ которой содержатся единицы по диагонали, а в $n+1$ столбце --- значения матрицы B .
 Последовательно исключает переменные методом Гаусса
 Матрица A должна содержать только значения, без неизвестных

```

> CalcPart2:=proc(A, B) local M, L, A_1, i, j, k, l; global
    m, n;

> A_1:=matrix(m,n+1);
> for i from 1 to m do for j from 1 to n do A_1[i,j]:=A[i,j]
    od; A_1[i,n+1]:=B[i,1] od;
    Прямой ход метода Гаусса
> for i from 1 to m do
>     M:=A_1[i,i+m];
>     for k from 1 to n+1 do A_1[i,k]:=A_1[i,k]/M; od;
>     for j from i+1 to m do
>         L:=A_1[j,i+m];
>         for k from 1 to n+1 do A_1[j,k]:=A_1[j,k]-A_1[i,k]*L;
    od;
>     od;
> od;
    Обратный ход метода Гаусса
> for i from m by -1 to 2 do
>     for j from i-1 by -1 to 1 do
>         L:=A_1[j,i+m];
>         for k from 1 to n+1 do A_1[j,k]:=A_1[j,k]-A_1[i,k]*L;
    od;
>     od;
> od;
> A_1;
> end;

```

```

CalcPart2 := proc(A, B)
local M, L, A_1, i, j, k, l;
global m, n;

```

```

A_I := linalg:-matrix(m, n + 1);
for i to m do for j to n do A_I[i, j] := A[i, j] end do; A_I[i, n + 1] := B[i, 1]
end do;
for i to m do
    M := A_I[i, i + m];
    for k to n + 1 do A_I[i, k] := A_I[i, k] / M end do;
    for j from i + 1 to m do
        L := A_I[j, i + m];
        for k to n + 1 do A_I[j, k] := A_I[j, k] - A_I[i, k]*L end do
    end do
end do;
for i from m by -1 to 2 do for j from i - 1 by -1 to 1 do
    L := A_I[j, i + m];
    for k to n + 1 do A_I[j, k] := A_I[j, k] - A_I[i, k]*L end do
end do
end do;
A_I
end proc

```

[>

[>

- Ввод исходных данных

Краткое описание используемых переменных.

a --- коэффициенты неизвестного полинома;

P --- коэффициенты, появляющиеся в производных;

B0, B1 --- значения правых частей полиномов в начальный и конечный моменты времени;

A --- содержит матрицу [*m*×*n*], все строки которой содержат векторы *a*;

T0, T1 --- содержит коэффициенты системы уравнений, зависящие от времени, в начальный и конечный моменты времени;

Tt --- содержит коэффициенты, зависящие от времени, в произвольный момент времени *t*;

n, m --- степень полинома+1 и число производных +1, значения которых закреплены в начальный и в конечный момент времени.

[> **n:=10: m:=4:**

[> **a:=vector(n):**

[> **A:=matrix(m,n):**

Введём исходные данные: начальное положение ϕ , начальную скорость ω , начальное

ускорение ϵ , начальный рывок $\frac{\partial}{\partial t} \epsilon$.

[> **phi0:=0; omega0; epsilon0:=0; epsilon10:=0;**

$\phi_0 := 0$

ω_0

$\epsilon_0 := 0$

$\epsilon_{10} := 0$

конечное положение ϕ , конечную скорость ω , конечное ускорение ϵ , конечный рывок

$\frac{\partial}{\partial t} \epsilon$.

> **phi1; omega1; epsilon1:=0; epsilon11:=0;**

ϕ_1

ω_1

$\epsilon_1 := 0$

$\epsilon_{11} := 0$

Конечное время регулирования

> **Tk:**

> **B0:=matrix(m,1,[phi0, omega0, epsilon0, epsilon10]);**

> **B1:=matrix(m,1,[phi1, omega1, epsilon1, epsilon11]);**

$B_0 := \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

$B_1 := \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \omega_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

>

— Расчёт первых m коэффициентов в полиноме и приведение числа неизвестных к нескольким независим переменным.

Из начальных условий, заданных в момент времени $t=0$, найдём первые четыре коэффициента $a_1 \dots a_4$

> **A:=InitprocA(a): P:=InitprocP():print(A), print(P);**

$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & a_9 & a_{10} \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & a_9 & a_{10} \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & a_9 & a_{10} \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & a_9 & a_{10} \end{bmatrix}$

$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 0 & 0 & 2 & 6 & 12 & 20 & 30 & 42 & 56 & 72 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 24 & 60 & 120 & 210 & 336 & 504 \end{bmatrix}$

> **T0:=InitprocT(0): print(T0);**

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

```
> A0:=MatrElProd(A,T0):A0_:=MatrElProd(A0,P):
```

Матрица C0 содержит в своих строках левую часть системы уравнений, правая часть содержится в матрице B0.

```
> C0:=matrix(m,1): for k from 1 to m do
  C0[k,1]:=sum(row(A0_,k)[i],i=1..n); od:
> print(C0);
```

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 2 a_3 \\ 6 a_4 \end{bmatrix}$$

```
> for k from 1 to m do a[k]:=solve(C0[k,1]=B0[k,1],a[k]); od:
```

Коэффициенты будут иметь следующий вид

```
> print(a);
```

$$[0, \omega 0, 0, 0, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}]$$

Из конечных условий найдём связь между оставшимися неизвестными коэффициентами. Поскольку число уравнений меньше числа неизвестных переменных, точное значение найти невозможно, но можно свести к минимуму число неизвестных в уравнении.

```
> T1:=InitprocT(Tk):print(T1);
```

$$\begin{bmatrix} 1 & Tk & Tk^2 & Tk^3 & Tk^4 & Tk^5 & Tk^6 & Tk^7 & Tk^8 & Tk^9 \\ 0 & 1 & Tk & Tk^2 & Tk^3 & Tk^4 & Tk^5 & Tk^6 & Tk^7 & Tk^8 \\ 0 & 0 & 1 & Tk & Tk^2 & Tk^3 & Tk^4 & Tk^5 & Tk^6 & Tk^7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & Tk & Tk^2 & Tk^3 & Tk^4 & Tk^5 & Tk^6 \end{bmatrix}$$

```
>
```

```
> A1:=InitprocA(a):
```

```
> C1:=MatrElProd(T1,P): print(C1);
```

$$\begin{bmatrix} 1 & Tk & Tk^2 & Tk^3 & Tk^4 & Tk^5 & Tk^6 & Tk^7 & Tk^8 & Tk^9 \\ 0 & 1 & 2 Tk & 3 Tk^2 & 4 Tk^3 & 5 Tk^4 & 6 Tk^5 & 7 Tk^6 & 8 Tk^7 & 9 Tk^8 \\ 0 & 0 & 2 & 6 Tk & 12 Tk^2 & 20 Tk^3 & 30 Tk^4 & 42 Tk^5 & 56 Tk^6 & 72 Tk^7 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 24 Tk & 60 Tk^2 & 120 Tk^3 & 210 Tk^4 & 336 Tk^5 & 504 Tk^6 \end{bmatrix}$$

```
> S1:=CalcPart2(C1, B1):print(S1);
```

$$\left[\frac{35}{Tk^4}, \frac{20}{Tk^3}, \frac{10}{Tk^2}, \frac{4}{Tk}, 1, 0, 0, 0, -Tk^4, -4 Tk^5, \frac{\phi 1}{Tk^4} \right]$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\frac{24 \phi 1}{Tk^3} - \frac{36 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk^2} - \frac{12 \left(-\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk} \right)}{Tk}}{6 Tk} - \left(\right. \\
& \left. \frac{\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk}}{2 Tk^4} \right. \\
& \left. - \frac{\frac{24 \phi 1}{Tk^3} - \frac{36 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk^2} - \frac{12 \left(-\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk} \right)}{Tk}}{2 Tk^3} \right) Tk^2 - \left(\frac{\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk}}{Tk^4} \right. \\
& \left. - \frac{\frac{24 \phi 1}{Tk^3} - \frac{36 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk^2} - \frac{12 \left(-\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk} \right)}{Tk}}{2 Tk^2} - 2 \right) \left(\right. \\
& \left. \frac{\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk}}{2 Tk^4} \right. \\
& \left. - \frac{\frac{24 \phi 1}{Tk^3} - \frac{36 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk^2} - \frac{12 \left(-\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk} \right)}{Tk}}{2 Tk^3} \right) Tk \left. \right) Tk \left. \right] \\
& \left[-\frac{84}{Tk^5}, -\frac{45}{Tk^4}, -\frac{20}{Tk^3}, -\frac{6}{Tk^2}, 0, 1, 0, 0, 4 Tk^3, 15 Tk^4, \frac{\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk}}{Tk^4} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\frac{24 \phi 1}{Tk^3} - \frac{36 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk^2} - \frac{12 \left(-\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk} \right)}{Tk}}{2 Tk^2} - 2 \left[\right. \\
& \quad \left. \frac{\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk}}{2 Tk^4} \right. \\
& \quad \left. - \frac{\frac{24 \phi 1}{Tk^3} - \frac{36 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk^2} - \frac{12 \left(-\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk} \right)}{Tk}}{2 Tk^3} \right] Tk \left. \right] \\
& \left[\frac{70}{Tk^6}, \frac{36}{Tk^5}, \frac{15}{Tk^4}, \frac{4}{Tk^3}, 0, 0, 1, 0, -6 Tk^2, -20 Tk^3, \frac{\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk}}{2 Tk^4} \right. \\
& \quad \left. - \frac{\frac{24 \phi 1}{Tk^3} - \frac{36 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk^2} - \frac{12 \left(-\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk} \right)}{Tk}}{2 Tk^3} \right] \\
& \left[-\frac{20}{Tk^7}, -\frac{10}{Tk^6}, -\frac{4}{Tk^5}, -\frac{1}{Tk^4}, 0, 0, 0, 1, 4 Tk, 10 Tk^2, \right. \\
& \quad \left. - \frac{\frac{24 \phi 1}{Tk^3} - \frac{36 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk^2} - \frac{12 \left(-\frac{12 \phi 1}{Tk^2} - \frac{8 \left(\omega 1 - \frac{4 \phi 1}{Tk} \right)}{Tk} \right)}{Tk}}{6 Tk^4} \right]
\end{aligned}$$

```
> C1_:=MatrElProd(S1,A1):
```

```
> for k from 1 to m do
```

```
  a[k+m]:=solve(simplify(sum(row(C1_,k)[i],i=1..n))=C1_[k,n+1],
  a[k+m]); od:
```

```
> for k from 1 to n do print(a[k]); od:
```

$$\begin{aligned} & 0 \\ & \omega 0 \\ & 0 \\ & 0 \\ & \frac{35 \phi 1 - 15 \omega 1 T k - 20 T k \omega 0 + T k^8 a_9 + 4 T k^9 a_{10}}{T k^4} \\ & - \frac{-39 \omega 1 T k + 84 \phi 1 - 45 T k \omega 0 + 4 T k^8 a_9 + 15 T k^9 a_{10}}{T k^5} \\ & \frac{2 (35 \phi 1 - 17 \omega 1 T k - 18 T k \omega 0 + 3 T k^8 a_9 + 10 T k^9 a_{10})}{T k^6} \\ & - \frac{2 (10 \phi 1 - 5 \omega 1 T k - 5 T k \omega 0 + 2 T k^8 a_9 + 5 T k^9 a_{10})}{T k^7} \\ & a_9 \\ & a_{10} \end{aligned}$$

```
[ >
```

Расчёт степенного закона без оптимизации ускорения.

Подставим в уравнения для закона управления вместо a[9] и a[10] нули.

```
> a_:=array(1..n): for i from 1 to n do a_[i]:=subs(a[9]=0,  
a[10]=0, a[i]): od:
```

```
> for i from 1 to n do print(a_[i]); od;
```

$$\begin{aligned} & 0 \\ & \omega 0 \\ & 0 \\ & 0 \\ & \frac{35 \phi 1 - 15 \omega 1 T k - 20 T k \omega 0}{T k^4} \\ & - \frac{-39 \omega 1 T k + 84 \phi 1 - 45 T k \omega 0}{T k^5} \\ & \frac{2 (35 \phi 1 - 17 \omega 1 T k - 18 T k \omega 0)}{T k^6} \\ & - \frac{2 (10 \phi 1 - 5 \omega 1 T k - 5 T k \omega 0)}{T k^7} \\ & 0 \\ & 0 \end{aligned}$$

```
[ >
```

— Оптимизация законов управления.

Число неизвестных сведено к минимуму, возьмём интеграл по времени и найдём

экстремум от $\int_0^{Tk} \varepsilon(t, a_9, a_{10})^2 dt$.

> **Tt:=InitprocT(t): print(Tt);**

$$\begin{bmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 & t^4 & t^5 & t^6 & t^7 & t^8 & t^9 \\ 0 & 1 & t & t^2 & t^3 & t^4 & t^5 & t^6 & t^7 & t^8 \\ 0 & 0 & 1 & t & t^2 & t^3 & t^4 & t^5 & t^6 & t^7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t & t^2 & t^3 & t^4 & t^5 & t^6 \end{bmatrix}$$

> **At:=InitprocA(a):**

> **St_:=MatrElProd(At, Tt): St:=MatrElProd(St_, P):**

Ускорение имеет вид

> **Epst:=sum(row(St, 3)[j], j=1..n);**

$$\begin{aligned} Epst := & \frac{12(35\phi_1 - 15\omega_1 Tk - 20Tk\omega_0 + Tk^8 a_9 + 4Tk^9 a_{10})t^2}{Tk^4} \\ & - \frac{20(-39\omega_1 Tk + 84\phi_1 - 45Tk\omega_0 + 4Tk^8 a_9 + 15Tk^9 a_{10})t^3}{Tk^5} \\ & + \frac{60(35\phi_1 - 17\omega_1 Tk - 18Tk\omega_0 + 3Tk^8 a_9 + 10Tk^9 a_{10})t^4}{Tk^6} \\ & - \frac{84(10\phi_1 - 5\omega_1 Tk - 5Tk\omega_0 + 2Tk^8 a_9 + 5Tk^9 a_{10})t^5}{Tk^7} + 56a_9 t^6 + 72a_{10} t^7 \end{aligned}$$

Оптимизируемый функционал:

> **It:=int(Epst^2, t=0..Tk):**

Возьмём частные производные по коэффициентам a_9, a_{10} .

> **for i from (2*m+1) to n do dIda[i]:=diff(It, a[i]): od;**

$$\begin{aligned} dIda_9 := & 576 a_{10} Tk^{14} + \frac{1}{13} (-24192 a_{10} Tk + 6272 a_9) Tk^{13} + \frac{1}{12} \left(\right. \\ & -18816 Tk a_9 - \frac{9408(10\phi_1 - 5\omega_1 Tk - 5Tk\omega_0 + 2Tk^8 a_9 + 5Tk^9 a_{10})}{Tk^7} + 25920 Tk^2 a_{10} \left. \right) \\ & Tk^{12} + \frac{1}{11} \left(20160 Tk^2 a_9 + \frac{6720(35\phi_1 - 17\omega_1 Tk - 18Tk\omega_0 + 3Tk^8 a_9 + 10Tk^9 a_{10})}{Tk^6} \right. \\ & \left. - 11520 Tk^3 a_{10} + \frac{28224(10\phi_1 - 5\omega_1 Tk - 5Tk\omega_0 + 2Tk^8 a_9 + 5Tk^9 a_{10})}{Tk^6} \right) Tk^{11} + \frac{1}{10} \left(\right. \\ & \left. -8960 Tk^3 a_9 - \frac{2240(-39\omega_1 Tk + 84\phi_1 - 45Tk\omega_0 + 4Tk^8 a_9 + 15Tk^9 a_{10})}{Tk^5} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{20160 (35 \phi_1 - 17 \omega_1 Tk - 18 Tk \omega_0 + 3 Tk^8 a_9 + 10 Tk^9 a_{10})}{Tk^5} \\
& - \frac{30240 (10 \phi_1 - 5 \omega_1 Tk - 5 Tk \omega_0 + 2 Tk^8 a_9 + 5 Tk^9 a_{10})}{Tk^5} + 1728 Tk^4 a_{10} \Bigg) Tk^{10} + \frac{1}{9} \Bigg(\\
& \frac{21600 (35 \phi_1 - 17 \omega_1 Tk - 18 Tk \omega_0 + 3 Tk^8 a_9 + 10 Tk^9 a_{10})}{Tk^4} \\
& + \frac{1344 (35 \phi_1 - 15 \omega_1 Tk - 20 Tk \omega_0 + Tk^8 a_9 + 4 Tk^9 a_{10})}{Tk^4} + 1344 Tk^4 a_9 \\
& + \frac{13440 (10 \phi_1 - 5 \omega_1 Tk - 5 Tk \omega_0 + 2 Tk^8 a_9 + 5 Tk^9 a_{10})}{Tk^4} \\
& + \frac{6720 (-39 \omega_1 Tk + 84 \phi_1 - 45 Tk \omega_0 + 4 Tk^8 a_9 + 15 Tk^9 a_{10})}{Tk^4} \Bigg) Tk^9 + \frac{1}{8} \Bigg(\\
& - \frac{4032 (35 \phi_1 - 15 \omega_1 Tk - 20 Tk \omega_0 + Tk^8 a_9 + 4 Tk^9 a_{10})}{Tk^3} \\
& - \frac{2016 (10 \phi_1 - 5 \omega_1 Tk - 5 Tk \omega_0 + 2 Tk^8 a_9 + 5 Tk^9 a_{10})}{Tk^3} \\
& - \frac{9600 (35 \phi_1 - 17 \omega_1 Tk - 18 Tk \omega_0 + 3 Tk^8 a_9 + 10 Tk^9 a_{10})}{Tk^3} \\
& - \frac{7200 (-39 \omega_1 Tk + 84 \phi_1 - 45 Tk \omega_0 + 4 Tk^8 a_9 + 15 Tk^9 a_{10})}{Tk^3} \Bigg) Tk^8 + \frac{1}{7} \Bigg(\\
& \frac{3200 (-39 \omega_1 Tk + 84 \phi_1 - 45 Tk \omega_0 + 4 Tk^8 a_9 + 15 Tk^9 a_{10})}{Tk^2} \\
& + \frac{4320 (35 \phi_1 - 15 \omega_1 Tk - 20 Tk \omega_0 + Tk^8 a_9 + 4 Tk^9 a_{10})}{Tk^2} \\
& + \frac{1440 (35 \phi_1 - 17 \omega_1 Tk - 18 Tk \omega_0 + 3 Tk^8 a_9 + 10 Tk^9 a_{10})}{Tk^2} \Bigg) Tk^7 \\
& - 80 Tk^5 (-39 \omega_1 Tk + 84 \phi_1 - 45 Tk \omega_0 + 4 Tk^8 a_9 + 15 Tk^9 a_{10}) \\
& - \frac{1312}{5} Tk^5 (35 \phi_1 - 15 \omega_1 Tk - 20 Tk \omega_0 + Tk^8 a_9 + 4 Tk^9 a_{10}) \\
dIda_{10} := & \frac{3456}{5} a_{10} Tk^{15} + 576 a_9 Tk^{14} \\
& + \frac{1}{13} \Bigg(- \frac{12096 (10 \phi_1 - 5 \omega_1 Tk - 5 Tk \omega_0 + 2 Tk^8 a_9 + 5 Tk^9 a_{10})}{Tk^7} - 60480 Tk^2 a_{10} \Bigg) Tk^{13}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{12} \left(-47040 Tk^2 a_9 + \frac{8640 (35 \phi 1 - 17 \omega 1 Tk - 18 Tk \omega 0 + 3 Tk^8 a_9 + 10 Tk^9 a_{10})}{Tk^6} \right. \\
& + 86400 Tk^3 a_{10} \left. \right) Tk^{12} + \frac{1}{11} \left(67200 Tk^3 a_9 \right. \\
& - \frac{2880 (-39 \omega 1 Tk + 84 \phi 1 - 45 Tk \omega 0 + 4 Tk^8 a_9 + 15 Tk^9 a_{10})}{Tk^5} - 43200 Tk^4 a_{10} \\
& + \frac{70560 (10 \phi 1 - 5 \omega 1 Tk - 5 Tk \omega 0 + 2 Tk^8 a_9 + 5 Tk^9 a_{10})}{Tk^5} \left. \right) Tk^{11} + \frac{1}{10} \left(-33600 Tk^4 a_9 \right. \\
& - \frac{50400 (35 \phi 1 - 17 \omega 1 Tk - 18 Tk \omega 0 + 3 Tk^8 a_9 + 10 Tk^9 a_{10})}{Tk^4} \\
& - \frac{100800 (10 \phi 1 - 5 \omega 1 Tk - 5 Tk \omega 0 + 2 Tk^8 a_9 + 5 Tk^9 a_{10})}{Tk^4} \\
& + \frac{1728 (35 \phi 1 - 15 \omega 1 Tk - 20 Tk \omega 0 + Tk^8 a_9 + 4 Tk^9 a_{10})}{Tk^4} + 6912 Tk^5 a_{10} \left. \right) Tk^{10} + \frac{1}{9} \left(\right. \\
& \frac{72000 (35 \phi 1 - 17 \omega 1 Tk - 18 Tk \omega 0 + 3 Tk^8 a_9 + 10 Tk^9 a_{10})}{Tk^3} + 5376 a_9 Tk^5 \\
& + \frac{50400 (10 \phi 1 - 5 \omega 1 Tk - 5 Tk \omega 0 + 2 Tk^8 a_9 + 5 Tk^9 a_{10})}{Tk^3} \\
& + \frac{16800 (-39 \omega 1 Tk + 84 \phi 1 - 45 Tk \omega 0 + 4 Tk^8 a_9 + 15 Tk^9 a_{10})}{Tk^3} \left. \right) Tk^9 + \frac{1}{8} \left(\right. \\
& - \frac{10080 (35 \phi 1 - 15 \omega 1 Tk - 20 Tk \omega 0 + Tk^8 a_9 + 4 Tk^9 a_{10})}{Tk^2} \\
& - \frac{8064 (10 \phi 1 - 5 \omega 1 Tk - 5 Tk \omega 0 + 2 Tk^8 a_9 + 5 Tk^9 a_{10})}{Tk^2} \\
& - \frac{36000 (35 \phi 1 - 17 \omega 1 Tk - 18 Tk \omega 0 + 3 Tk^8 a_9 + 10 Tk^9 a_{10})}{Tk^2} \\
& - \frac{24000 (-39 \omega 1 Tk + 84 \phi 1 - 45 Tk \omega 0 + 4 Tk^8 a_9 + 15 Tk^9 a_{10})}{Tk^2} \left. \right) Tk^8 + \frac{1}{7} \left(\right. \\
& \frac{12000 (-39 \omega 1 Tk + 84 \phi 1 - 45 Tk \omega 0 + 4 Tk^8 a_9 + 15 Tk^9 a_{10})}{Tk} \\
& + \frac{14400 (35 \phi 1 - 15 \omega 1 Tk - 20 Tk \omega 0 + Tk^8 a_9 + 4 Tk^9 a_{10})}{Tk} \\
& + \frac{5760 (35 \phi 1 - 17 \omega 1 Tk - 18 Tk \omega 0 + 3 Tk^8 a_9 + 10 Tk^9 a_{10})}{Tk} \left. \right) Tk^7
\end{aligned}$$

$$-320 Tk^6 (-39 \omega_1 Tk + 84 \phi_1 - 45 Tk \omega_0 + 4 Tk^8 a_9 + 15 Tk^9 a_{10})$$

$$- \frac{4848}{5} Tk^6 (35 \phi_1 - 15 \omega_1 Tk - 20 Tk \omega_0 + Tk^8 a_9 + 4 Tk^9 a_{10})$$

>

> **AdI:=diff(It,a[10],a[10]);**

$$AdI := \frac{976 Tk^{15}}{5005}$$

> **CdI:=diff(It,a[9],a[9]);**

$$CdI := \frac{48 Tk^{13}}{5005}$$

> **BdI:=diff(It,a[10],a[9]);**

$$BdI := \frac{216 Tk^{14}}{5005}$$

> **Delta:=AdI*CdI-BdI**2;**

$$\Delta := \frac{192 Tk^{28}}{25050025}$$

Найдём точку экстремума.

> **Qvar:={}: Qequ:={}:**

> **for i from 2*m+1 to n do Qvar:=Qvar union {a[i]}: Qequ:=Qequ union {dIda[i]}: od:**

> **Q:=solve(Qequ, Qvar);**

$$Q := \left\{ a_9 = -\frac{10(277 \omega_1 Tk + 290 Tk \omega_0 - 567 \phi_1)}{9 Tk^8}, a_{10} = \frac{70(-2 \phi_1 + \omega_1 Tk + Tk \omega_0)}{Tk^9} \right\}$$

> **assign(Q);**

Проверим правильность решения методом подстановки

> **for i from (2*m+1) to n do simplify(subs(Q, dIda[i])); od;**

0

0

Т. к. $Tk > 0$, то очевидно, что $\Delta > 0$, следовательно, экстремум существует. Из этого также следует, что $A > 0$ (и $C > 0$), следовательно, в данной точке достигается минимум.

>

Проверка найденных коэффициентов методом подстановки.

> **Aend:=InitprocA(a): Bend:=MatrElProd(Aend,P):**

Cend:=MatrElProd(Bend,T0):

> **Dend:=matrix(m,1):for i from 1 to m do**

Dend[i,1]:=simplify(sum(row(Cend,i)[j],j=1..n)); od:

> **print(Dend);**

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \omega_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

```
> Aend:=InitprocA(a): Bend:=MatrElProd(Aend,P):
  Cend:=MatrElProd(Bend,T1):
> Dend:=matrix(m,1):for i from 1 to m do
  Dend[i,1]:=simplify(sum(row(Cend,i)[j],j=1..n)); od:
> print(Dend);
```

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \omega_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

```
> for i from 1 to n do print(a[i]); od:
```

$$\begin{aligned} & 0 \\ & \omega_0 \\ & 0 \\ & 0 \\ & \frac{105 \phi_1 - \frac{385 \omega_1 T_k}{9} - \frac{560 T_k \omega_0}{9}}{T_k^4} \\ & - \frac{\frac{1981 \omega_1 T_k}{9} + 504 \phi_1 - \frac{2555 T_k \omega_0}{9}}{T_k^5} \\ & \frac{2 \left(525 \phi_1 - \frac{721 \omega_1 T_k}{3} - \frac{854 T_k \omega_0}{3} \right)}{T_k^6} \\ & - \frac{2 \left(570 \phi_1 - \frac{2435 \omega_1 T_k}{9} - \frac{2695 T_k \omega_0}{9} \right)}{T_k^7} \\ & - \frac{10 (277 \omega_1 T_k + 290 T_k \omega_0 - 567 \phi_1)}{9 T_k^8} \\ & \frac{70 (-2 \phi_1 + \omega_1 T_k + T_k \omega_0)}{T_k^9} \end{aligned}$$

```
>
```

– Расчёт параметров phi, omega, epsilon и прочих параметров.

Нож движется практически поступательно в зоне реза, поэтому, в этой зоне практически повторяет движение кривошипа.

Радиус кривошипа.

> **R:=0.7:**

Мерная длина L=4...6 м

> **L:=6:**

Реальная длина, которую необходимо отмерить, будет меньше приблизительно на радиус кривошипа R

> **l:=L-R;**

$$l := 5.3$$

Коэффициент обгона ножей k:=1,075

> **k:=1.075:**

В начале участка реза линейная скорость режущей кромки ножа больше линейной скорости кривошипа в

> **kv1:=0.96:** раза.

В начале зоны регулирования линейная скорость режущей кромки ножа составляет

> **kv0:=1.075:** скорости кривошипа.

Скорость проката v= 2,3 м/с

> **v:=2.3:**

Угловая скорость входа в зону регулирования (с линейной скоростью v);

> **om0:=v/(R*kv0);**

$$om0 := 3.056478406$$

Угловая скорость входа в зону резания (с линейной скоростью v*k);

> **om1:=k/kv1*v/R;**

$$om1 := 3.679315477$$

Время регулирования tk

> **tk:=l/v;**

$$tk := 2.304347826$$

Начальный угол регулирования phi0

> **ph0:=0:**

Конечный угол регулирования

> **ph1:=(360-60)*Pi/180;**

$$ph1 := \frac{5\pi}{3}$$

Ускорения и рывки в начале и в конце зоны регулирования полагаем равными нулю

> **eps0:=0: eps1:=0: eps10:=0: eps11:=0:**

> **sbst0:={phi0=ph0,omega0=om0,epsilon0=eps0,epsilon10=eps10};**

$$sbst0 := \{ 0 = 0, \omega_0 = 3.056478406 \}$$

> **sbst1:={phi1=ph1,omega1=om1,epsilon1=eps1,epsilon11=eps11, Tk=tk};**

$$sbst1 := \{ 0 = 0, Tk = 2.304347826, \omega_1 = 3.679315477, \phi_1 = \frac{5\pi}{3} \}$$

Подставим начальные и конечные условия в выражение для закона управления с оптимизацией.

> **for i from 1 to n do evalf(subs(sbst0, sbst1, a[i])); od;**


```
0.  
3.056478406  
0.  
0.  
-8.90727690  
18.88045693  
-17.28146229  
8.22237257  
-1.987682456  
0.1929415897
```

Подставим начальные и конечные условия в выражение для закона управления без оптимизации

```
> for i from 1 to n do evalf(subs(sbst0, sbst1, a_[i])); od;
```

```
0.  
3.056478406  
0.  
0.  
-3.006797096  
3.197875498  
-1.170843307  
0.1463604982  
0.  
0.
```

```
[ >
```

- График зависимости $\text{int}(\epsilon^2)$ от $a[9]$ и $a[10]$

Построим график зависимости оптимизируемого интеграла в функции от коэффициентов $a[9]$, $a[10]$.

```
[ > for i from 1 to 10 do a_1[i]:=subs(sbst0, sbst1, a[i]): od:
```

```
[ > a_1[9]:=FirstArg; a_1[10]:=SecondArg;
```

```
          a_1_9 := FirstArg
```

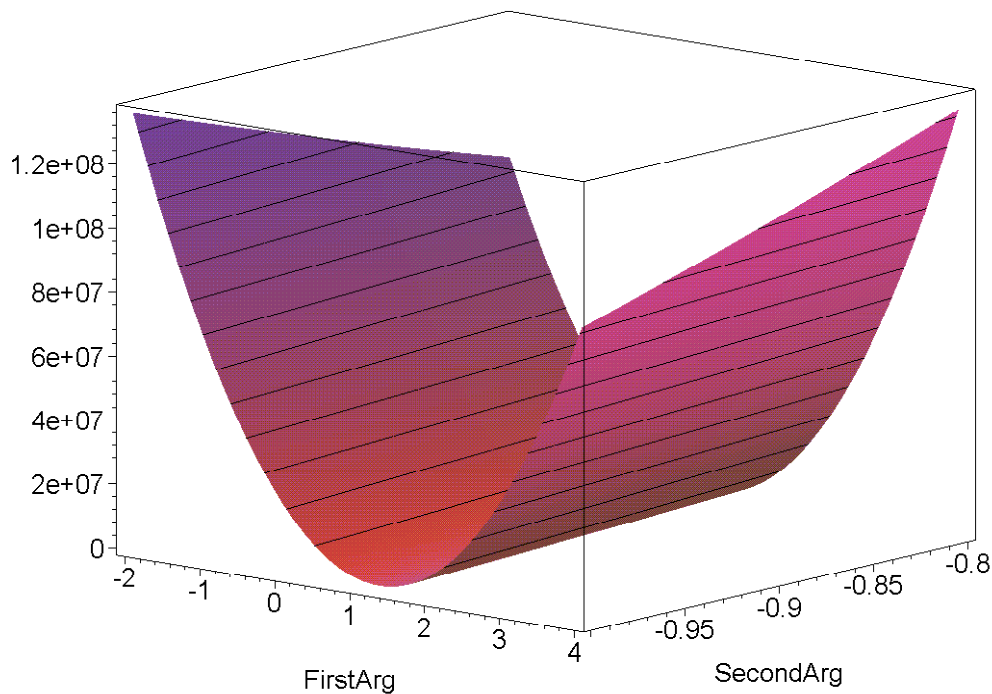
```
          a_1_10 := SecondArg
```

```
[ > PhiGr:= sum(a_1[j]*(t**(j-1)),j=1..n):
```

```
[ > EpsGr:=diff(PhiGr,t$2):
```

```
[ > IEps2gr:=int((EpsGr)^2,t=0..tk):
```

```
[ > plot3d(IEps2gr, FirstArg=-2...4,  
          SecondArg=-1..-0.8,style=patchcontour, axes=boxed,  
          light=[70,40,1,1,1],grid=[40,40],orientation=[-50,75]);
```



[>

Графики полученных законов управления.

```
> Phi=Sum(a[j]*(t**(j-1)),j=1..n);
> Phi_=Sum(a_[j]*(t**(j-1)),j=1..n);
```

$$\Phi = \sum_{j=1}^{10} a_j t^{(j-1)}$$

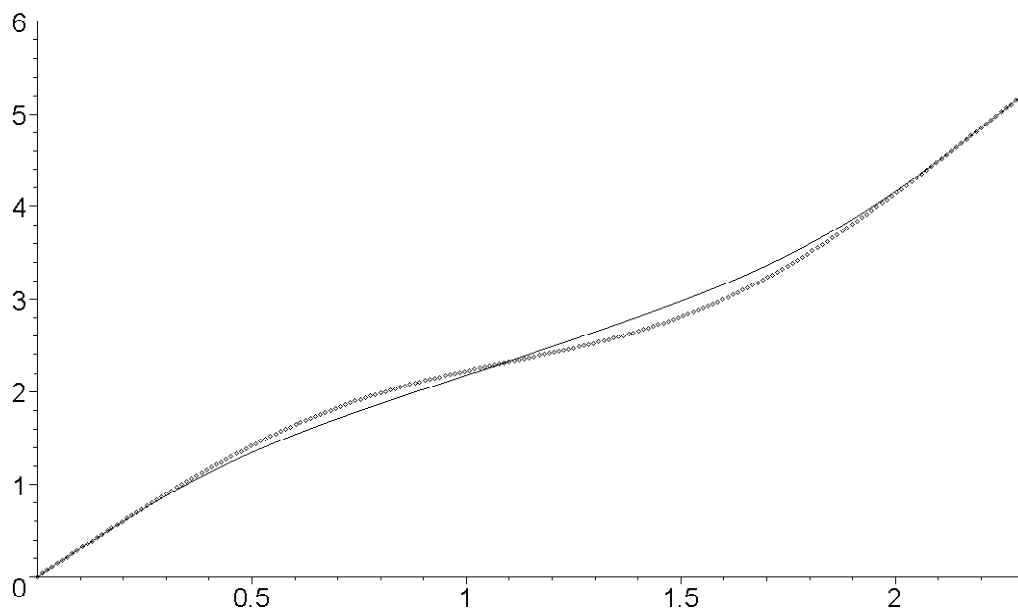
$$\Phi_{_} = \sum_{j=1}^{10} a_{_j} t^{(j-1)}$$

[>

[Начальные и конечные условия

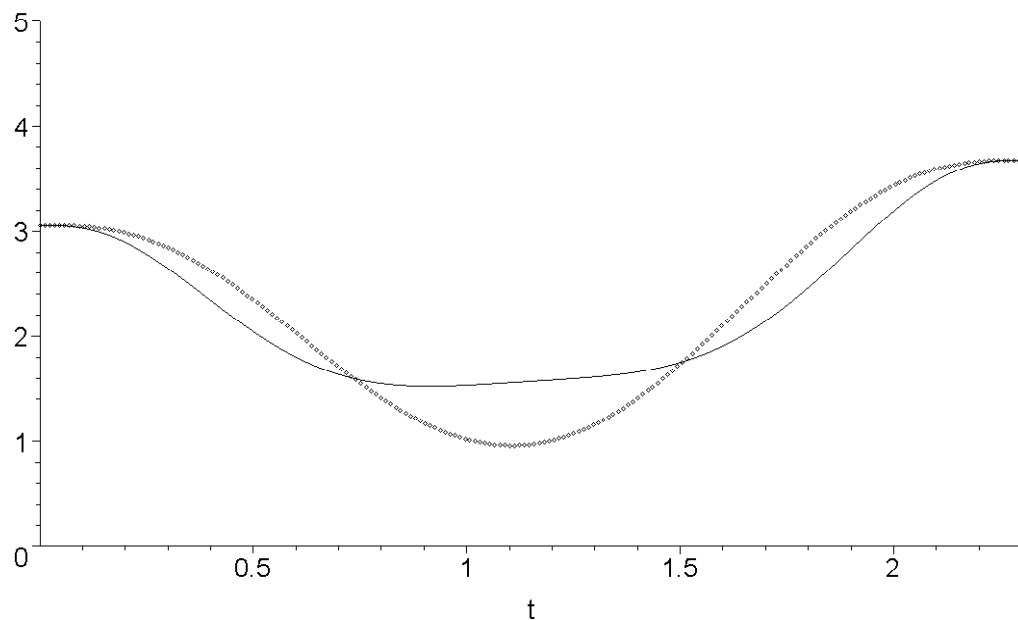
```
> Phi:=subs(sbst0, sbst1, sum(a[j]*(t**(j-1)),j=1..n));
> Phi_:=subs(sbst0, sbst1, sum(a_[j]*(t**(j-1)),j=1..n));
> Omega:=diff(Phi,t): Omega_:=diff(Phi_,t):
> Epsilon:=diff(Omega,t): Epsilon_:=diff(Omega_,t):
> DEpsilon:=diff(Epsilon,t): DEpsilon_:=diff(Epsilon_,t):
> plot([Phi, Phi_],t=0..tk,0..6, style=[line, point],
colour=[black, black], title=`ЗАКОН УПРАВЛЕНИЯ УГЛОМ ПОВОРОТА
КРИВОШИПА`);
```

ЗАКОН УПРАВЛЕНИЯ УГЛОМ ПОВОРОТА КРИВОШИПА



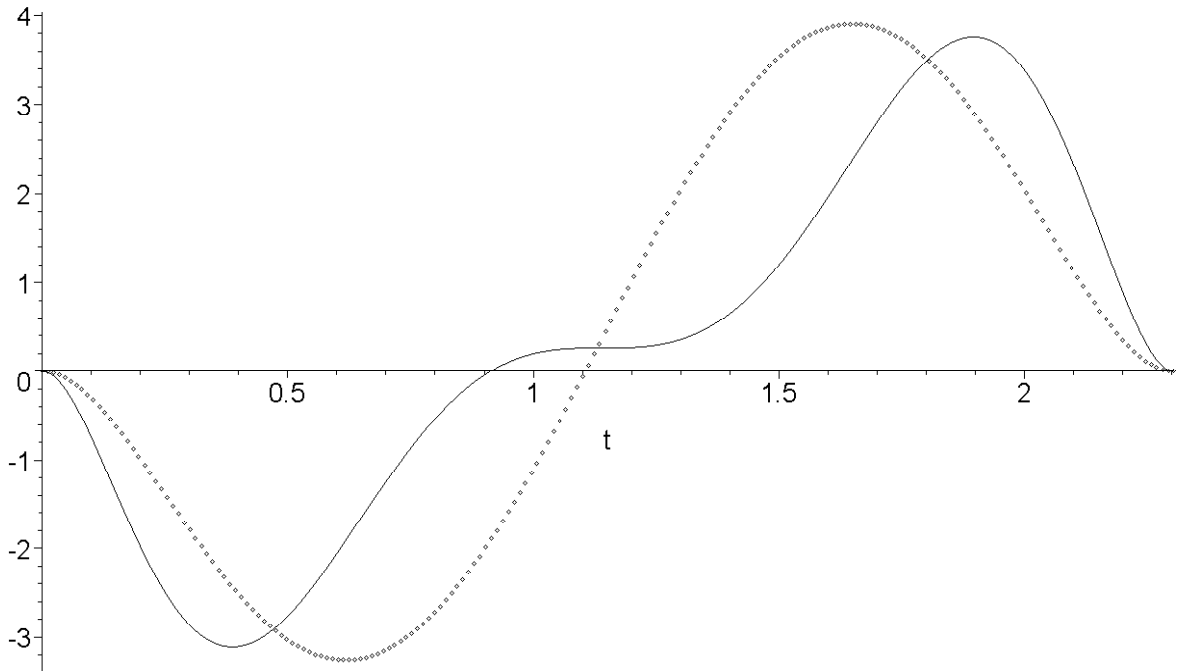
```
> plot([Omega, Omega_], t=0..tk, 0..5  
      , style=[line, point], colour=[black, black], title=`ЗАКОН  
      УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ КРИВОШИПА`);
```

ЗАКОН УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ КРИВОШИПА



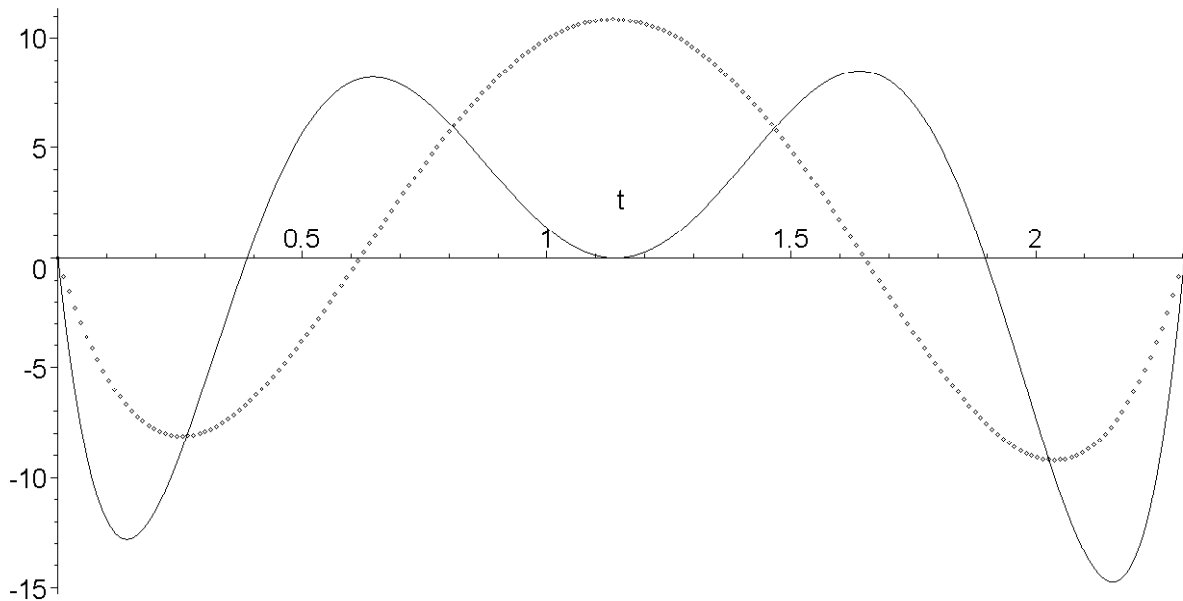
```
> plot([Epsilon, Epsilon_], t=0..tk, style=[line,  
      point], colour=[black, black], title=`УГЛОВОЕ УСКОРЕНИЕ  
      КРИВОШИПА`);
```

УГЛОВОЕ УСКОРЕНИЕ КРИВОШИПА



```
> plot([DEpsilon,DEpsilon_],t=0..tk,style=[line,point],colour=[
black, black], title=`РЫВОК КРИВОШИПА`);
```

РЫВОК КРИВОШИПА



```
[ >
```

Выбор закона управления во второй половине зоны реза (после рубя)

```
> aAfterRez:=array(1..n);
```

```
          aAfterRez := array(1 .. 10, [ ])
```

```
Время рубя положим равным
```

```
> Tmdl:=Pi/6/((k*v/R+v/R)/2);
```

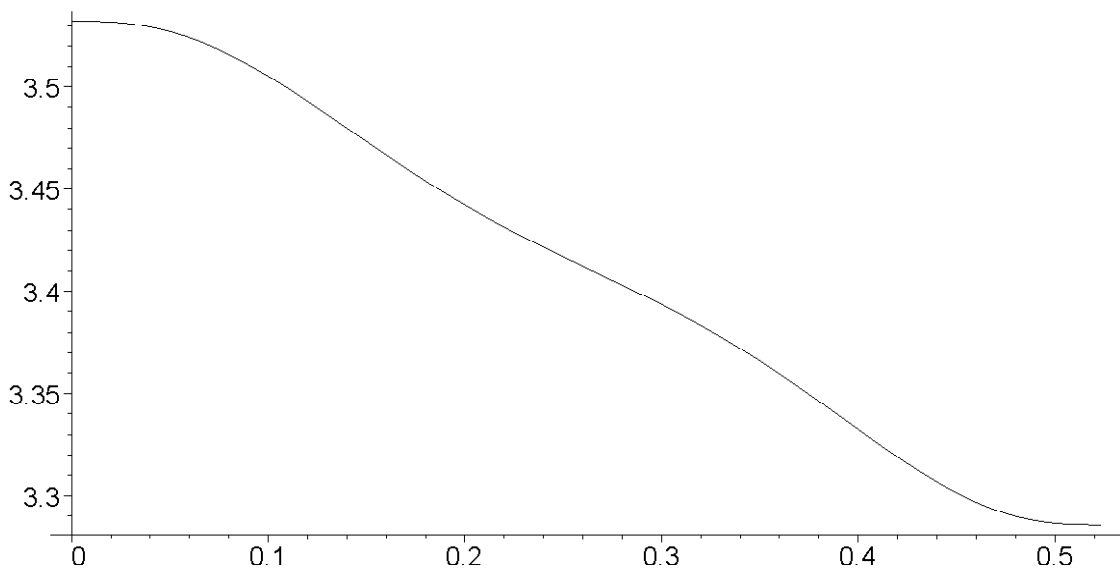
```
> evalf(Tmdl);
```

```
          Tmdl := 0.04889121705 π
```

```
          0.1535962883
```

```
> for i from 1 to n do aAfterRez[i]:=subs(omega0=k*v/R,
```

```
[ omega1=v/R, Tk=Tmdl, phil=Pi/6, a[i]); od:  
[ > print(evalf(aAfterRez[10]));  
[ 0.4621909347  
[ > k*v/R; v/R;  
[ 3.532142857  
[ 3.285714286  
[ > Phi:=subs(sum(aAfterRez[j]*(t**(j-1)),j=1..n)):  
[ > Omega:=diff(Phi,t):  
[ > plot([Phi, Omega,t=0..Tmdl], colour=black, title=`ЗАДАНИЕ НА  
[ СКОРОСТЬ В ФУНКЦИИ УГЛА КРИВОШИПА`);  
[ ЗАДАНИЕ НА СКОРОСТЬ В ФУНКЦИИ УГЛА КРИВОШИПА
```



```
[ >  
[ >  
[ >  
[ >
```

Приложение №2. Файл MathCad с основными расчётами.

Содержание.

1. Исходные данные механизма и двигателя.
 2. Расчёт параметров двигателя.
 3. Расчёт параметров механизма.
 4. Законы управления во время регулирования мерной длины.
 5. Графики моментов инерции и сил сопротивления.
 6. Расчёт необходимой энергии для руба.
 7. Выбор закона управления для зоны руба и зоны синхронного движения с прокатом.
 8. Диаграмма момента на кривошипном валу.
 9. Проверка двигателя на нагрев.
 10. Адаптация (вывод основных соотношений).
-

1. Исходные данные механизма и двигателя.

Параметры механизма

Число редукции кривошипа		$i_{кр} := 5.21$
Радиус кривошипа, м		$R := 0.7$
Скорость движения полотна, м/с		$v := 2.3$
Коэффициент обгона ножей в момент начала руба		$k := 1.075$
Коэффициент, учитывающий соотношение линейных скоростей кривошипа и режущей кромки ножа (находится из плана скоростей)		
в начале руба		$k_{v1} := 0.96$
в конце руба		$k_{v0p} := 1.015$
перед входом в зону регулирования		$k_{v0} := 1.075$
Мерная длина проката, м		$l = 4...6 \text{ м}$
Расчёты будем вести для длины		$l := 5.25 \text{ м}$
Угол зоны управления, рад	$\phi_y := \frac{360 - 60}{360} \cdot 2 \cdot \pi$	$\phi_y = 5.236$
Суммарный угол зоны реза и зоны синхронизации, рад	$\phi_p := \frac{60}{360} \cdot 2 \cdot \pi$	$\phi_p = 1.047$

Саму зону резания можно разделить на две части: собственно рез (первые 30 град) и зона синхронного движения с прокатом, когда нож ещё с ним может контактировать

Исходное положение ножа относительно начала зоны регулирования, рад	$\phi_{и} := \frac{53 + 60}{180} \cdot \pi$	$\phi_{и} = 1.972$
К. п. д. редуктора	$\eta_p := 95 \cdot \%$	
Цикл поступления раскатов, с	$t_{ц} := 41$	

Параметры двигателя

Тип	МП1250–200У3	
Число пар полюсов		$p := 6$
Номинальная скорость двигателя, об/мин		$n_N := 200$
Сопротивление обмотки якоря, Ом		$R_a := 0.044$
Сопротивление дополнительных полюсов, Ом		$R_{\partial n} := 0.0223$
Сопротивление компенсационной обмотки, Ом		$R_{KO} := 0.00402$
Номинальное напряжение, В		$U_N := 850$
Номинальная мощность, Вт		$P_N := 1250 \cdot 10^3$
Номинальный ток, А		$I_N := 1.580 \cdot 10^3$
Перегрузочная способность по току		$\lambda_I := 2.5$
Максимально допустимая продолжительность перегрузки по току		$t_{nepmax} := 15$

2. Расчёт параметров двигателя

$$R_{a\omega} := R_a + R_{\omega n} + R_{\omega o} \quad \text{Сопротивление якорной цепи}$$

$$R_{a\omega} = 0.07 \quad \text{Ом}$$

$$\text{Номинальная скорость в рад/с} \quad \omega_N := n_N \cdot \frac{\pi}{30} \quad \omega_N = 20.944$$

$$\text{Номинальный момент двигателя, Н·м} \quad M_N := \frac{P_N}{\omega_N} \quad M_N = 5.968 \times 10^4$$

$$\text{Номинальный К. П. Д. двигателя} \quad \eta := \frac{P_N}{U_N \cdot I_N} \quad \eta = 93.075 \%$$

$$\text{ЭДС двигателя при номинальном режиме работы, В} \quad E_N := U_N - I_N \cdot R_{a\omega}$$

$$E_N = 738.894$$

$$\text{Коэффициент ЭДС} \quad k_e := \frac{E_N}{\omega_N} \quad k_e = 35.28 \quad \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$$

$$\text{Коэффициент момента} \quad k_m := \frac{M_N}{I_N} \quad k_m = 37.774 \quad \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}$$

Вычислим индуктивность обмотки якоря по формуле Линвиля-Уманского.

$$\text{Коэффициент } \beta \text{ для скомпенсированных машин} \quad \beta := 0.25$$

$$\text{Индуктивность обмотки якоря, Гн} \quad L_a := \beta \cdot \frac{U_N}{p \cdot \omega_N \cdot I_N}$$

$$L_a = 1.07 \times 10^{-3}$$

$$\text{Максимальное значение тока, А} \quad I_{\max} := \lambda_I \cdot I_N \rightarrow 3950.0000$$

Сводный список параметров двигателя

Номинальное напряжение	$U_N = 850$	B
Номинальный тока	$I_N = 1.58 \times 10^3$	A
Максимальный ток	$I_{max} = 3.95 \times 10^3$	A
Сопротивление двигателя	$R_{aц} = 0.07$	$Ом$
Индуктивность двигателя	$L_a = 1.07 \times 10^{-3}$	$Гн$
Коэффициент момента	$km = 37.774$	$\frac{Н \cdot м}{А}$
Коэффициент ЭДС	$ke = 35.28$	$\frac{В \cdot с}{рад}$
Номинальный момент	$M_N = 5.968 \times 10^4$	$Н \cdot м$

3. Расчёт параметров механизма

Угловая скорость кривошипа при входе в зону регулирования	$\omega_0 := \frac{v}{k_{v0} \cdot R}$	$\omega_0 = 3.056$	$\frac{рад}{с}$
Минимальная скорость в момент окончания реза	$\omega_{0p} := \frac{1}{k_{v0p}} \cdot \frac{v}{R}$	$\omega_{0p} = 3.237$	$\frac{рад}{с}$
Угловая скорость входа в зону реза	$\omega_1 := \frac{k}{k_{v1}} \cdot \frac{v}{R}$	$\omega_1 = 3.679$	$\frac{рад}{с}$
Угол начала зоны регулирования	$\phi_0 := 0$	$рад$	
Угол окончания зоны регулирования	$\phi_1 := \phi_y$	$\phi_1 = 5.236$	$рад$

Реально при расчёте длины следует учесть, что к окончанию рубка часть проката следующей заготовки δl_p уже находится под ножницами и учесть его можно следующими способами:

1. Рассчитать геометрически. Длина уже прошедшего под ножницы раската считается равной проекции зоны реза на плоскость движения проката. Длина при этом будет рассчитываться по

формуле $\delta l_p := 2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)$. Этот метод неточен, поскольку к

окончанию реза кромка ножа может находиться дальше, чем передний край следующей заготовки.

2. Измерением длины (с помощью датчиков тянуще-следящих роликов). Длина уже прошедшего под ножницы проката измеряется непосредственно. Этот метод будет использоваться в реальной системе.

3. Рассчитать на основе скорости проката и времени реза. При этом участок заготовки рассчитывается как $\delta l_p := v \cdot T_{реза}$, где v --- скорость проката; $T_{реза}$ --- время, за которое была отрезана заготовка.

$$\delta l_p := 2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)$$

Время регулирования	$T_k := \frac{l - \delta l_p}{v}$	$T_k = 1.978$	$с$
---------------------	-----------------------------------	---------------	-----

4. Законы управления во время регулирования мерной длины.

Значения коэффициентов вычисляются в функции от a_9 , a_{10} по следующим формулам

$$A(A_9, A_{10}) := \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{-20 \cdot Tk \cdot \omega_0 + Tk^8 \cdot A_9 + 4 \cdot Tk^9 \cdot A_{10} - 15 \cdot \omega_1 \cdot Tk + 35 \cdot \phi_1}{Tk^4} \\ \frac{-45 \cdot Tk \cdot \omega_0 + 4 \cdot Tk^8 \cdot A_9 + 15 \cdot Tk^9 \cdot A_{10} - 39 \cdot \omega_1 \cdot Tk + 84 \cdot \phi_1}{-Tk^5} \\ \frac{-18 \cdot Tk \cdot \omega_0 + 3 \cdot Tk^8 \cdot A_9 + 10 \cdot Tk^9 \cdot A_{10} - 17 \cdot \omega_1 \cdot Tk + 35 \cdot \phi_1}{0.5 \cdot Tk^6} \\ \frac{-5 \cdot Tk \cdot \omega_0 + 2 \cdot Tk^8 \cdot A_9 + 5 \cdot Tk^9 \cdot A_{10} - 5 \cdot \omega_1 \cdot Tk + 10 \cdot \phi_1}{-0.5 \cdot Tk^7} \\ A_9 \\ A_{10} \end{pmatrix}$$

Оптимальные значения A_9 , A_{10} вычисляются по следующим формулам

$$A_9 := \frac{10}{9 \cdot Tk^8} \cdot (-290 \cdot Tk \cdot \omega_0 - 277 \omega_1 \cdot Tk + 567 \cdot \phi_1)$$

$$A_{10} := \frac{70}{Tk^9} \cdot (Tk \cdot \omega_0 + Tk \cdot \omega_1 - 2 \cdot \phi_1)$$

Зависимость изменения угла поворота кривошипа в функции от времени t и коэффициентов A_9, A_{10}

$$F(t, A_9, A_{10}) := \sum_{i=1}^{10} A(A_9, A_{10})_i \cdot t^{i-1}$$

Зависимость изменения угловой скорости кривошипа в функции от времени и коэффициентов A_9, A_{10}

$$\Omega(t, A_9, A_{10}) := \sum_{i=2}^{10} (i-1) \cdot A(A_9, A_{10})_i \cdot t^{i-2}$$

Зависимость изменения углового ускорения кривошипа в функции от времени и коэффициентов A_9, A_{10}

$$E(t, A_9, A_{10}) := \sum_{i=3}^{10} (i-1) \cdot (i-2) \cdot A(A_9, A_{10})_i \cdot t^{i-3}$$

$$t := 0, \frac{T_k}{50} .. T_k$$

Построим графики законов управления с оптимизацией и без неё. Для этого зададим следующие функции

Без оптимизации

$$\phi_0(t) := F(t, 0, 0)$$

$$\omega_0(t) := \Omega(t, 0, 0)$$

$$\varepsilon_0(t) := E(t, 0, 0)$$

С оптимизацией

$$\phi_1(t) := F(t, A_9, A_{10})$$

$$\omega_1(t) := \Omega(t, A_9, A_{10})$$

$$\varepsilon_1(t) := E(t, A_9, A_{10})$$

Пунктирной линией обозначен закон регулирования с оптимизацией (по полиному 9-ой степени), сплошной линией --- закон без оптимизации (по полиному 7-ой степени).

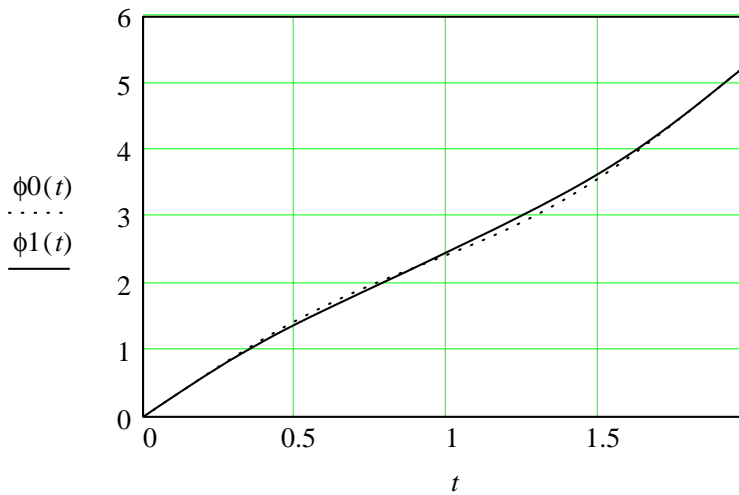


Рис. 1. Закон угла поворота кривошипа.

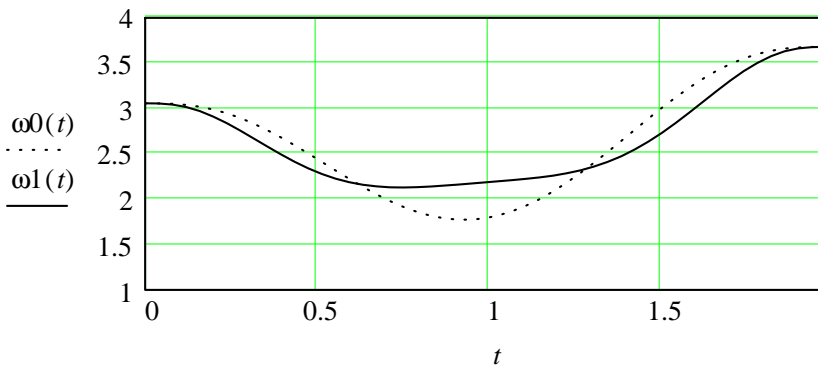


Рис. 2. Угловая скорость кривошипа.

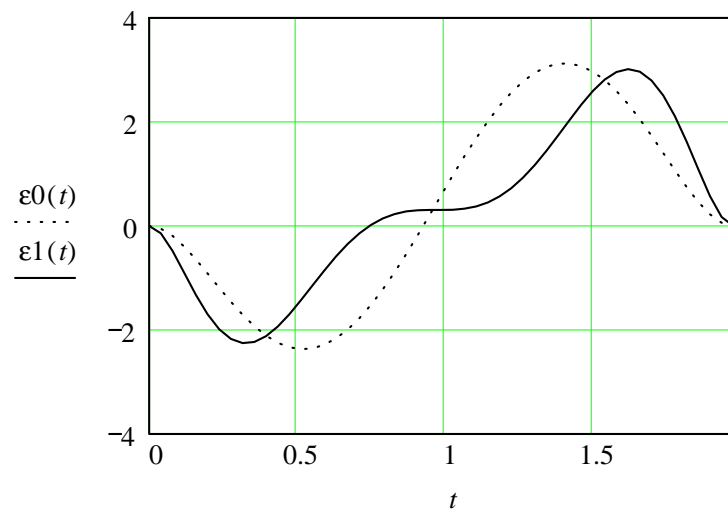


Рис. 3. Угловое ускорение кривошипа

Рассчитаем эффективность от применения закона управления по полиному 9-ой степени по сравнению с законом управления по полиному 7-ой (без учёта момента сопротивления и переменного характера момента инерции). Потери в обмотке двигателя пропорциональны квадрату тока, а значит и квадрату момента двигателя. Угловое ускорение пропорционально моменту на валу двигателя за вычетом статического момента сопротивления. Поскольку статический момент не учитываем, потери будут пропорциональны интегралу от квадрата ускорения.

$$I(A_9, A_{10}) := \int_0^{Tk} (E(t, A_9, A_{10}))^2 dt$$

Значение интеграла с оптимизацией

$$I1 := I(A_9, A_{10}) \quad I1 = 4.864$$

Значение интеграла без оптимизации

$$I2 := I(0, 0) \quad I2 = 6.971$$

Итого потери уменьшились на $\delta := \frac{I2 - I1}{I2} \quad \delta = 30.236\%$

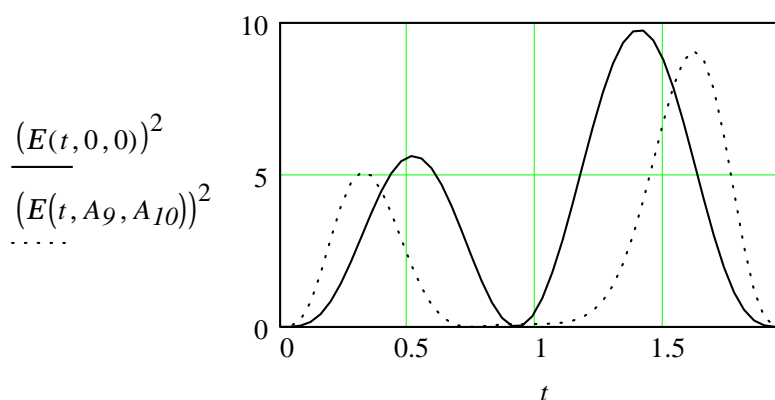


Рис. 4. График квадрата ускорения

5. Графики моментов инерции и сил сопротивления.

Моменты инерции и сопротивления механизма

Считаем файлы данных переменного момента инерции $J2$ и угла поворота кривошипа.

$$i := 1..24$$

$$JД := \text{READPRN}("J2_2.dat")^T \quad Fj := \frac{\pi}{180} \cdot \text{READPRN}("Fj.dat")^T + \phi_{и} - 2 \cdot p$$

$$JД_{i+23} := JД_i$$

$$Fj_{i+23} := Fj_i + 2 \cdot \pi$$

Т. к. в исходном файле момент инерции приведён к валу одного двигателя в режиме реза двумя двигателями, то необходимо его привести к валу кривошипа по формуле

$$J2 := 2 \cdot i_{кр}^2 \cdot JД$$

Построим функцию $J(\phi)$

$$J_ := \text{lspline}(Fj, J2)$$

$$J(\phi) := \text{interp}(J_, Fj, J2, \phi)$$

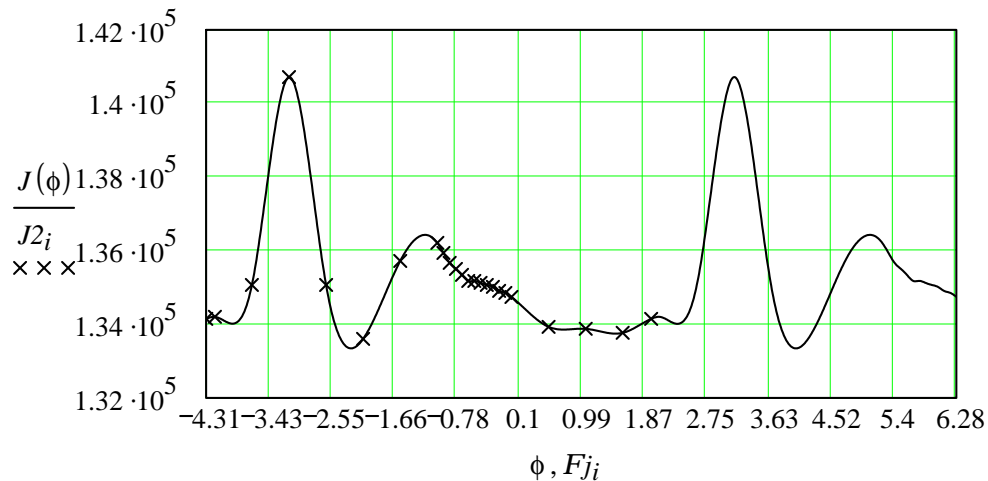


Рис. 5. Момент инерции.

Считаем файлы данных переменного момента сопротивления и угла поворота кривошипа.

$$i := 1..24$$

$$M2 := \text{READPRN}("Mc2_2.dat")^T \quad Fm := \frac{p}{180} \cdot \text{READPRN}("Fm.dat")^T + \phi_{и}$$

Т. к. в исходном файле момент сопротивления дан в кН, а все расчёты ведутся в СИ, то момент следует умножить на 1 000.

$$M2 := M2 \cdot 1000$$

$$M(\phi) := \text{if}(\phi \geq \phi_{\text{н}}, \text{linterp}(Fm, M2, \phi), \text{linterp}(Fm, M2, \phi + 2 \cdot \pi))$$

$$M(\phi) := \begin{cases} \text{linterp}(Fm, M2, \phi) & \text{if } \phi \geq \phi_{\text{н}} \\ \text{linterp}(Fm, M2, \phi + 2 \cdot \pi) & \text{if } \phi < \phi_{\text{н}} \end{cases}$$

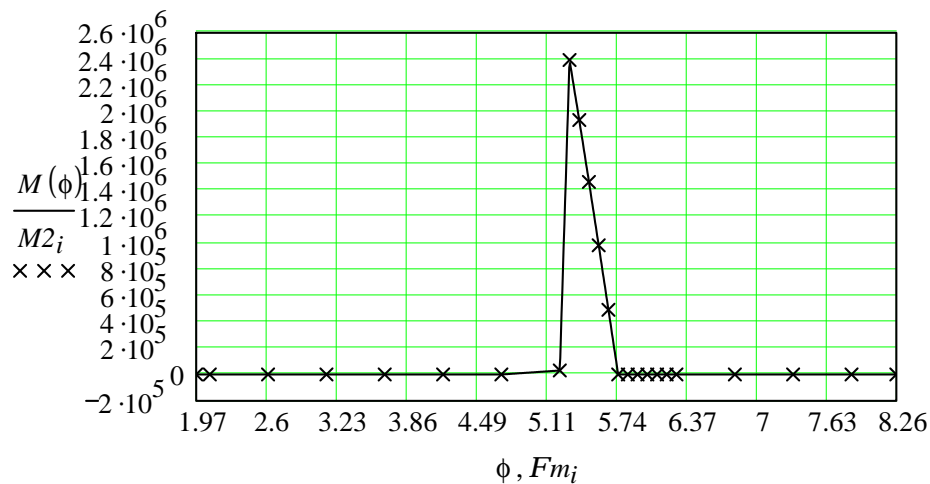


Рис. 6. Момент сопротивления.

Расчёт производной момента инерции по углу поворота кривошипа dJ(f)/df.

$$DJ(\phi) := \frac{d}{d\phi} J(\phi)$$

Применим теперь интерполяцию к DJ(φ), т. к. MathCad интеграл от DJ не считает.

$$i := 1 .. 75$$

$$FDJ_i := 2 \cdot p \cdot \frac{i-1}{70} \quad DJY_i := DJ(FDJ_i)$$

$$DJS := \text{lspline}(FDJ, DJY)$$

Производная момента инерции по углу поворота кривошипа

$$dJ(\phi) := \text{interp}(DJS, FDJ, DJY, \phi)$$

$$\phi := 0, \frac{2 \cdot \pi}{85} .. 2 \cdot \pi \quad i := 1, 5 .. 75$$

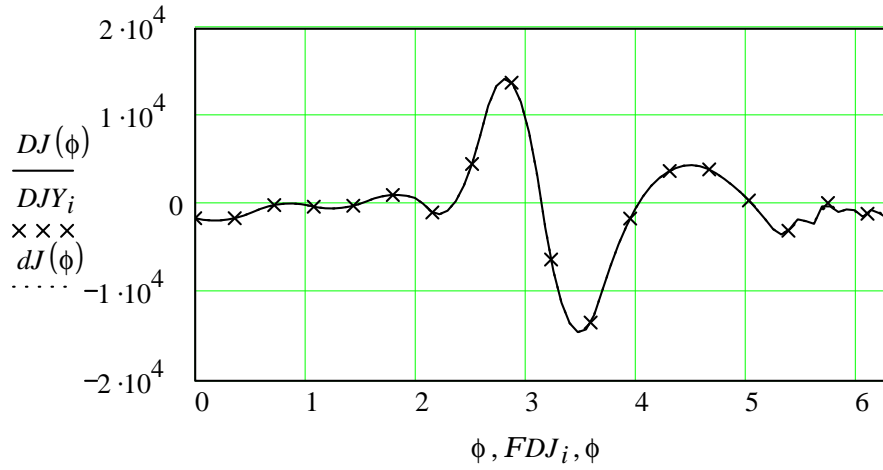


Рис. 7. Производная момента инерции.

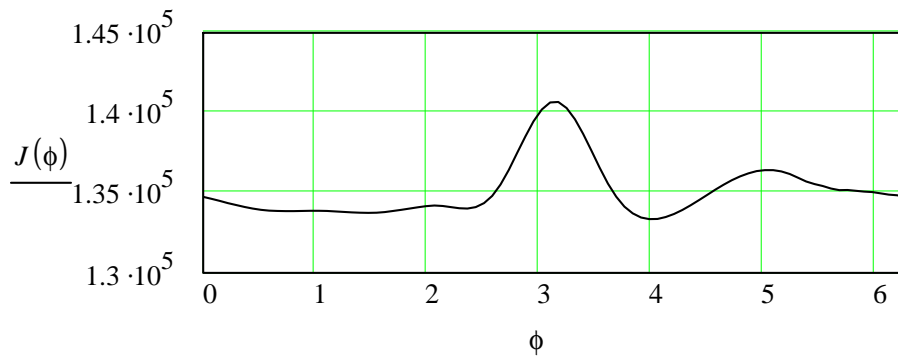


Рис. 8. Момент инерции.

Сохранение файлов данных для последующего использования в MatLab.

$$i := 1 .. 201$$

$$D\phi_{arr_i} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{i - 1}{200}$$

$$DJ_{arr_i} := dJ(D\phi_{arr_i})$$

Производная момента инерции
по углу поворота кривошипа

Момент сопротивления в функции
угла поворота кривошипа

$$MM_i := M(D\phi_{arr_i})$$

$$\mathbf{WRITEPRN("dJ.dt")} := DJ_{arr}$$

$$\mathbf{WRITEPRN("Mc.dt")} := MM$$

Момент инерции в функции
угла поворота кривошипа

$$JJ_i := J(D\phi_{arr_i})$$

WRITEPRN("J2_2.dt") := JJ

Угол поворота кривошипа

WRITEPRN("f.dt") := D\phi_{arr}

6. Расчёт необходимой энергии для рубя.

Рассчитаем потери энергии в процессе рубя

$$\phi := 0, \frac{2 \cdot \pi}{500} .. 2 \cdot \pi$$

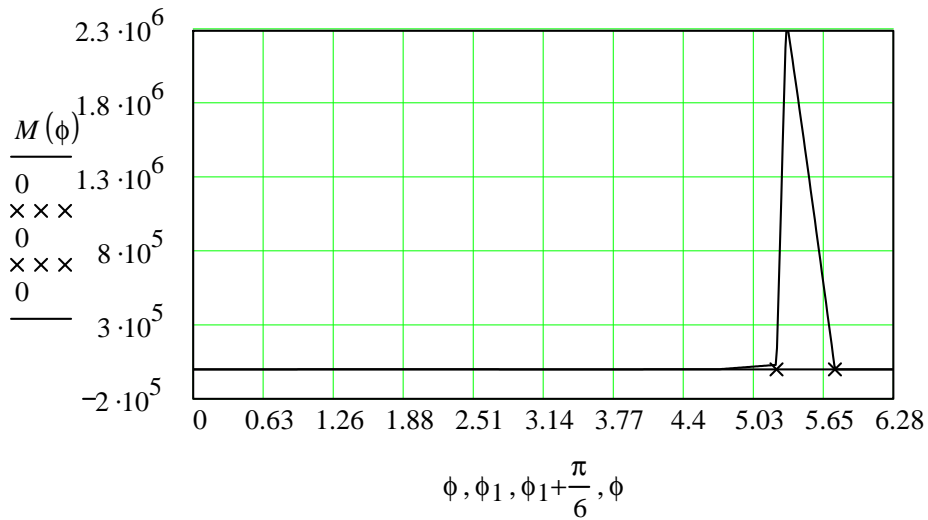


Рис. 9. Зависимость $M_{сопр}$ от угла.

Изменение момента сопротивления за полный оборот кривошипа.

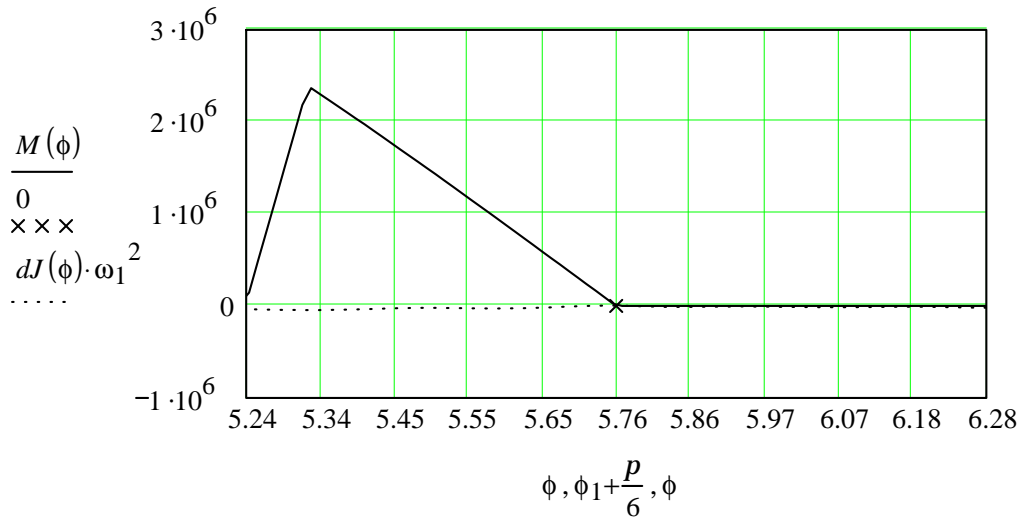


Рис.10. Зависимость $M_{сопр}$ от угла.

Изменение момента сопротивления в зоне реза.

Энергия, затрачиваемая на руб

$$E := \int_{\phi_1}^{\phi_1 + \frac{P}{6}} M(\phi) d\phi \quad E = 6.355 \times 10^5 \quad \text{Дж}$$

Кинетическая энергия в начале руба

$$E_{K1} := \frac{J(\phi_1) \cdot \omega_1^2}{2}$$
$$E_{K1} = 9.22 \times 10^5 \quad \text{Дж}$$

Минимальная кинетическая энергия в конце руба, которой должен обладать механизм

$$E_{K2} := \frac{J\left(\phi_1 + \frac{P}{6}\right) \cdot \omega_{0p}^2}{2} \quad E_{K2} = 7.083 \times 10^5 \quad \text{Дж}$$

Часть кинетической энергии, которая может быть истрчена на руб

$$E_{KP} := E_{K1} - E_{K2} \quad E_{KP} = 2.137 \times 10^5 \quad \text{Дж}$$

Эта энергия от необходимой для руба составляет

$$E_{KP\%} := \frac{E_{KP}}{E} \quad E_{KP\%} = 33.626\%$$

Рассчитаем общую энергию, которую могут выдать двигатели во время руба

Момент на валах кривошипов при скорости ω_1 и номинальной мощности двигателей

$$M_{kpN} := \frac{2 \cdot M_N \cdot i_{kp}}{1.1} \cdot \eta_p \quad M_{kpN} = 5.371 \times 10^5 \quad \text{Н·м}$$

Коэффициент 2 берётся из тех соображений, что два двигателя работают на один общий кривошипный вал, коэффициент 1,1 учитывает неравномерность загрузки двигателей

Энергия, выделяемая на пути резания

$$E_{\text{дв}N} := M_{\text{кр}N} \cdot \frac{\pi}{6} \quad E_{\text{дв}N} = 2.812 \times 10^5 \quad \text{Дж}$$

Требуемая энергия: $E_{\text{тр}} := E - E_{\text{кр}} \quad E_{\text{тр}} = 4.218 \times 10^5 \quad \text{Дж}$

Видно, что при работе двигателя с номинальным моментом энергии на руб не хватит. Поэтому двигатель должен работать с перегрузкой по току.

Момент, развиваемый двигателями при максимально допустимой рабочей перегрузке по току на валу кривошипа

$$M_{\text{кр}m} := \frac{2}{1.1} \cdot \lambda_{\Gamma} \cdot M_N \cdot i_{\text{кр}} \cdot \eta_{\text{р}} \quad M_{\text{кр}m} = 1.343 \times 10^6 \quad \text{Н}\cdot\text{м}$$

Общая энергия во время рубя $E_{\text{Д}m\text{ax}} := M_{\text{кр}m} \cdot \frac{\pi}{6}$

$$E_{\text{Д}m\text{ax}} = 7.031 \times 10^5 \quad \text{Дж}$$

Она превышает требуемую в

$$\frac{E_{\text{Д}m\text{ax}}}{E_{\text{тр}}} = 1.667 \quad \text{раз}$$

Как видно, при работе с перегрузкой энергии достаточно, выдаваемой двигателем за оборот достаточно.

7. Выбор законов управления для зоны руба и зоны синхронного движения с прокатом.

Проверим: достаточно ли максимального момента двигателя, чтобы осуществить руб.

Максимальный момент сопротивления механизма

$$M_{cmax} := \max(M2) \quad M_{cmax} = 2.392 \times 10^6 \quad \text{Н}\cdot\text{м}$$

$$\text{Максимальный момент двигателя} \quad M_{крт} = 1.343 \times 10^6 \quad \text{Н}\cdot\text{м}$$

Из графика рис. 11. видно, что момент, развиваемый двигателем меньше максимального момента сопротивления механизма. Из этого следует, что на участке руба энергия должна частично браться из кинетической энергии механизма. Найдём углы, при которых момент сопротивления механизма становится равным максимальному моменту двигателя, приведённому к валу кривошипа.

Первая точка ϕ_b (когда момент сопротивления становится больше максимального момента двигателя)

$$\phi_b := \phi_1 \quad \text{Зададимся первым приближением по графику}$$

Рассчитаем значение

$$\phi_b := \text{root}(M(\phi_b) - M_{крт}, \phi_b) \quad \phi_b = 5.284$$

$$\text{Проверим, насколько велика ошибка} \quad M(\phi_b) - M_{крт} = -6.286 \times 10^{-9}$$

Расчёт был выполнен верно.

Вторая точка ϕ_e (когда момент сопротивления становится больше максимального момента двигателя)

$$\phi_e := \phi_1 + 0.2 \quad \text{Зададимся первым приближением по графику}$$

Рассчитаем значение

$$\phi_e := \text{root}(M(\phi_e) - M_{крт}, \phi_e) \quad \phi_e = 5.52$$

$$\text{Проверим, насколько мала ошибка} \quad M(\phi_e) - M_{крт} = -2.328 \times 10^{-10}$$

Расчёт был выполнен верно.

$$\phi_b \cdot \frac{180}{p} = 302.778$$

$$\phi_e \cdot \frac{180}{p} = 316.262$$

$$\phi := \phi_1, \phi_1 + \frac{2 \cdot \pi - \phi_1}{100} .. 2 \cdot \pi$$

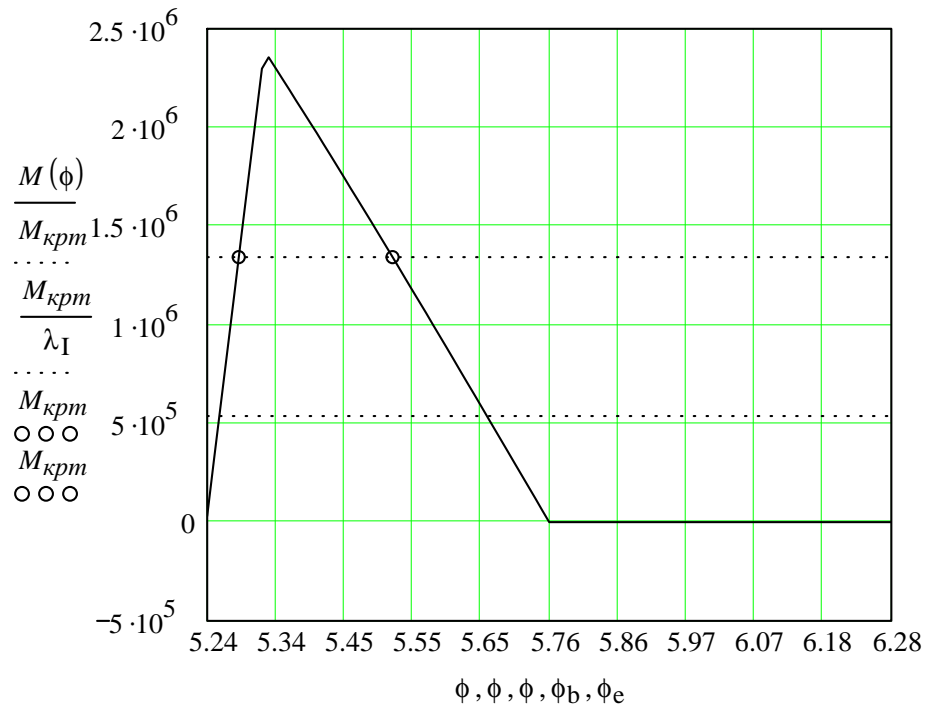


Рис. 11. Моменты двигателя и механизма.

Рассчитаем минимальный запас кинетической энергии, которой должен обладать механизм

$$E_{\text{дон}} := \int_{\phi_b}^{\phi_e} (M(\phi) - M_{\text{крт}}) d\phi \quad E_{\text{дон}} = 1.245 \times 10^5 \quad \text{Дж}$$

Рассчитаем избыток кинетической энергии, которым будет обладать механизм, если при угле поворота ϕ_b скорость кривошипа будет ω_1 .

$$E_{\text{изб}} := \frac{J(\phi_b) \cdot \omega_1^2}{2} - \frac{J(\phi_e) \cdot \omega_{0p}^2}{2} \quad E_{\text{изб}} = 2.112 \times 10^5 \quad \text{Дж}$$

В процентах запас энергии составляет

$$E_{зан} := \frac{E_{изб} - E_{дон}}{E_{дон}} \quad E_{зан} = 69.604\%$$

Отсюда видно, что при настройке электропривода, величина максимального рабочего момента может быть уменьшена.

Рассчитаем падение скорости

Энергия в положении кривошипа фб

$$E_{Кб} := \frac{J(\phi_b) \cdot \omega_1^2}{2} \quad E_{Кб} = 9.21 \times 10^5 \quad Дж$$

Энергия в положении кривошипа фе

$$E_{КД} := E_{Кб} - E_{дон} \quad E_{КД} = 7.965 \times 10^5 \quad Дж$$

Скорость кривошипа в положении фе

$$\omega_K := \sqrt{\frac{2 \cdot E_{КД}}{J(\phi_e)}} \quad \omega_K = 3.429 \quad \frac{рад}{с}$$

Таким образом, падение скорости составляет

$$\omega_{\Pi} := \omega_1 - \omega_K \quad \omega_{\Pi} = 0.25 \quad \frac{рад}{с}$$

В зоне руба регулятор положения не используется. На регулятор скорости подаётся задание на поддержание скорости на уровне ω_1 . В зоне синхронизации задание на скорость плавно снижается до ω_0 .

8. Диаграмма момента на кривошипном валу.

Построим диаграмму момента двигателя на кривошипном валу во время реза.

Её можно разбить на три участка.

В начале первого участка скорость кривошипа соответствует заданной. Двигательный момент приближенно равен моменту сопротивления механизма, но не больше максимально допустимого рабочего. Участок располагается от начала реза ϕ_1 до угла ϕ_e .

$$M_{Дкрпг}(M_c) := \text{if}(M_c < M_{крт}, M_c, M_{крт})$$

В начале второго участка скорость кривошипа ниже заданной на $\omega_п$. Привод должен начать отрабатывать образовавшееся в конце первого участка рассогласование. Двигательный момент приближенно равен сумме момента сопротивления механизма и динамического момента. Участок располагается от положения ϕ_e и до положения ϕ_d , которое предстоит найти. Участок заканчивается, как только скорость достигнет заданного значения.

Прирост скорости в функции от поворота кривошипа будет определяться функцией (динамическим моментом, вызванным изменением момента инерции пренебрегаем)

$$\Delta\omega(\phi) := \int_{\phi_e}^{\phi} \frac{M_{крт} - M(\phi)}{J(\phi)} d\phi$$

Зададимся первым приближением $\phi_d := \phi_e$

Рассчитаем положение кривошипа, при котором скорость достигнет заданного значения ω_1

$$\phi_d := \text{root}(\Delta\omega(\phi_d) - \omega_п, \phi_d) \quad \phi_d = 5.63 \quad \text{рад}$$

Проверим, насколько мала ошибка

$$\Delta\omega(\phi_d) - \omega_п = -2.24 \times 10^{-5}$$

Расчёт был выполнен верно.

$$\phi_d \cdot \frac{180}{p} = 322.596$$

На третьем участке скорость кривошипа соответствует заданной. Двигательный момент приближенно равен моменту сопротивления механизма. Участок располагается от положения ϕ_d до окончания реза 2π .

Окончательно функция момента примет вид

$$M_{Дкр}(\phi) := \mathbf{if}[(\phi < \phi_e) + (\phi > \phi_d), M_{Дкрg}(M(\phi)), M_{крт}]$$

$$\phi := \phi_1, \phi_1 + 0.02 \dots \phi_1 + \frac{1.1 \cdot \pi}{3}$$

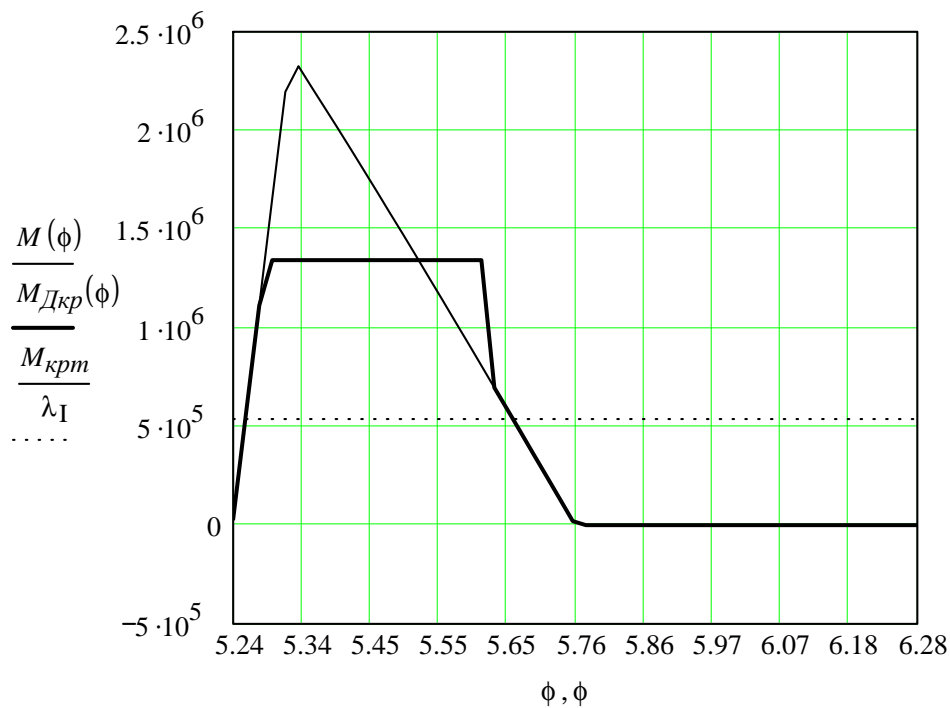


Рис. 12. Диаграмма момента двигателя.

График диаграммы двигательного момента на кривошипном валу и момента сопротивления механизма.

Построим диаграмму момента двигателя во время реза.

$$i := 1 \dots 100$$

$$Ms := \mathbf{READPRN}("Mdiag.dt") \quad Fs := \mathbf{READPRN}("Fdiag.dt")$$

$$Mdiag(\phi) := \mathbf{if}(\phi < \phi_1, \mathbf{linterp}(Fs, Ms, \phi), M_{Дкр}(\phi))$$

$$\phi := 0, 0.001 \dots 2 \cdot \pi$$

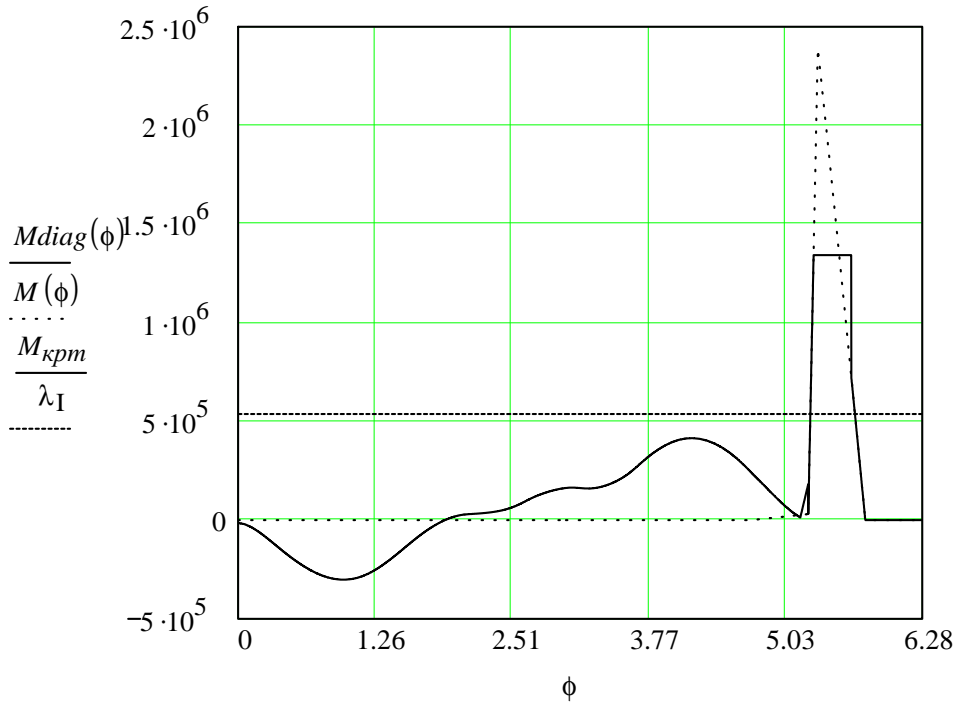


Рис. 13. Диаграмма момента двигателя.

Общая диаграмма момента двигателя в функции от угла поворота кривошипа.

Найдём угол, на котором момент выше номинального. Первая точка ϕ_{bN} (когда момент сопротивления становится больше номинального момента двигателя)

$\phi_{bN} := \phi_1$ Зададимся первым приближением по графику
Рассчитаем значение

$$\phi_{bN} := \text{root} \left(M_{Дкр}(\phi_{bN}) - \frac{M_{крт}}{\lambda_I}, \phi_{bN} \right) \quad \phi_{bN} = 5.255$$

$$M(\phi_{bN}) - \frac{M_{крт}}{\lambda_I} = -7.101 \times 10^{-9} \quad \text{Проверим, насколько мала ошибка}$$

Расчёт был выполнен верно.

Вторая точка ϕ_{eN} (когда момент сопротивления становится меньше номинального момента двигателя)

$\phi_{eN} := 5.68$ Зададимся первым приближением по графику

Рассчитаем значение

$$\phi_{eN} := \mathbf{root} \left(M_{Дкр}(\phi_{eN}) - \frac{M_{крт}}{\lambda_I}, \phi_{eN} \right) \quad \phi_{eN} = 5.664 \quad \text{рад}$$

$$M(\phi_{eN}) - \frac{M_{крт}}{\lambda_I} = -1.513 \times 10^{-9} \quad \text{Проверим, насколько мала ошибка}$$

Было найдено верное решение

Оценим время, в течение которого двигатели работают с перегрузкой.

$$t_{пер} := \frac{\phi_{eN} - \phi_{bN}}{\omega_0} \quad t_{пер} = 0.134 \quad \text{с}$$

Время перегрузки дл двигателя не превышает максимально допустимого для выбранного двигателя $t_{перmax} = 15$ с.

9. Проверка двигателя на нагрев.

Проверка двигателя на нагрев производится методом эквивалентного момента для наиболее тяжёлого режима реза на мерные длины 5,25 м (8 мерных длин из раската 43,8 м, последняя длина увеличена).

В этом режиме на каждый раскат производится 9 пусков и 9 торможений двигателя при 9-и резах.

Выражение для эквивалентного момента имеет вид

$$M_{\text{Э}} := \sqrt{\frac{9 \cdot \int_0^{T_{\text{рег}}} M_{\text{Дрег}}(t)^2 dt + 9 \cdot \int_0^{T_{\text{рез}}} M_{\text{Дрез}}(t)^2 dt}{t_{\text{ц}}}}$$

где $T_{\text{рег}}$ и $M_{\text{Дрег}}(t)$ --- время регулирования и функция момента двигателя в зоне регулирования мерной длины; $T_{\text{рез}}$ и $M_{\text{Дрез}}(t)$ --- время реза и функция момента двигателя в зоне реза проката; $t_{\text{ц}}$ --- продолжительность цикла подачи раската.

Значение первого интеграла можно получить с помощью MatLab'a. В скрипте Matlab'a приложение № 3 рассчитывается значение интеграла квадрата момента на кривошипном валу за период регулирования мерной длины.

$$M2t_{\text{кр}} := 8.78 \cdot 10^{10}$$

Приведём её к валу двигателя

$$M2t_{\text{Д}} := M2t_{\text{кр}} \cdot \left(\frac{1.1}{2 \cdot i_{\text{кр}}} \right)^2 \quad M2t_{\text{Д}} = 9.785 \times 10^8$$

Вычислим значение второго интеграла.

$$\text{Средний момент при резе} \quad M_{\text{среза}} := 135 \cdot 10^3$$

$$\text{Продолжительность реза} \quad t_{\text{реза}} := 0.22$$

$$M2t_{\text{Др}} := (M_{\text{среза}})^2 \cdot t_{\text{реза}} \quad M2t_{\text{Др}} = 4.01 \times 10^9$$

Рассчитаем теперь эквивалентный момент

$$M_{\text{Э}} := \sqrt{\frac{9 \cdot M_{2t_{\text{Д}}} + 9 \cdot M_{2t_{\text{Др}}}}{t_{\text{ц}}}} \quad M_{\text{Э}} = 3.309 \times 10^4$$

Загрузка двигателя по нагреву

$$\frac{M_{\text{Э}}}{M_{\text{N}}} = 55.442 \%$$

10. Адаптация.

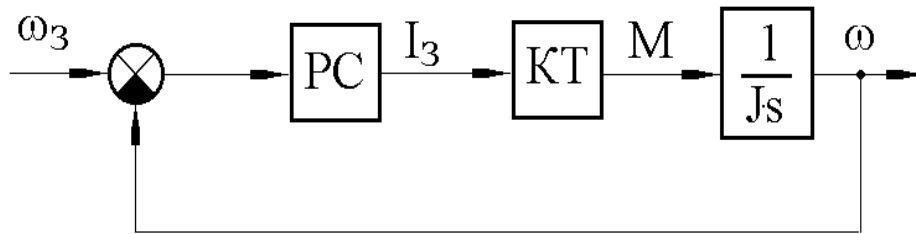


Рис. 14. Упрощённая структурная схема электропривода. На структурной схеме изображено: РС --- регулятор скорости; КТ --- замкнутый контур тока; $1/(J_s)$ --- механическая часть привода; ω_3 , ω --- заданное и действительное значения скорости; I_3 --- заданное значение тока в процентах от номинального; M ---момент на валу двигателя.

Когда задание на ток $I_3=100$ (см. рис. 14), момент на выходе соответствует номинальному моменту двигателя.

Постоянной времени контура тока ввиду её малости по сравнению с механической постоянной времени двигателя пренебрегаем

Постоянную времени контура тока приближенно можно считать равной удвоенной постоянной времени тиристорного преобразователя

$$\tau_\mu := 2 \cdot 0.0033 \quad \tau_\mu = 6.6 \times 10^{-3}$$

$$J_{max} := \max(JД)$$

Механическая постоянная времени

$$T_M := \frac{J_{max} \cdot \omega_N}{\frac{2}{1.1} \cdot M_N} \quad T_M = 0.5$$

где M_N --- номинальный момент при работе обоих двигателей;

J_{max} --- максимальный момент инерции, приведённый к валу одного двигателя; ω_N --- номинальная скорость двигателя.

Поэтому, контур тока можно представить пропорциональным звеном

$$k_{кт} := \frac{I_{max} \cdot km}{200} \quad k_{кт} = 746.039$$

Разомкнутый контур скорости

$$W_{KC}(s) = F_{KT}(s) \frac{1}{J \cdot s} \cdot k_{ДС} \frac{t_{PC} \cdot s + 1}{T_{PC} \cdot s}$$

где $k_{ДС}$ --- коэффициент передач датчика скорости; J --- приведённый к валу двигателя момент инерции; T_{PC} и τ_{PC} --- постоянные времени регулятора скорости

$$W_{KC}(s) = k_{км} \cdot \frac{1}{J \cdot s} \cdot \frac{\tau_{PC} \cdot s + 1}{T_{PC} \cdot s}$$

$$W_{KC}(s) = \frac{t_{PC} \cdot s + 1}{\frac{T_{PC} \cdot J}{k_{км}} \cdot s^2}$$

С другой стороны, настроенный на модульный оптимум контур скорости, должен удовлетворять шаблону

$$W_{KC'}(s) = \frac{4 \cdot \tau_{\mu} \cdot s + 1}{8 \cdot \tau_{\mu}^2 \cdot s^2 \cdot (\tau_{\mu} \cdot s + 1)}$$

где τ_{μ} --- постоянная времени фильтра.

$$\frac{W_{KC}(s)}{t_m \cdot s + 1} = W_{KC'}(s)$$

$$\frac{t_{PC} \cdot s + 1}{\frac{T_{PC} \cdot J}{k_{км}} \cdot s^2} \cdot \frac{1}{\tau_{\mu} \cdot s + 1} = \frac{4 \cdot \tau_{\mu} \cdot s + 1}{8 \cdot t_m^2 \cdot s^2 \cdot (\tau_{\mu} \cdot s + 1)}$$

$$\frac{\tau_{PC} \cdot s + 1}{\left(\frac{T_{PC} \cdot J}{k_{км}} \right)} = \frac{4 \cdot \tau_{\mu} \cdot s + 1}{8 \cdot t_m^2}$$

Откуда находим

$$\frac{T_{PC} \cdot J}{k_{km}} = 8 \cdot t_m^2 \quad T_{PC} = \frac{\tau_\mu^2 \cdot 8 \cdot k_{km}}{J}$$

$$\tau_{PC} = 4 \cdot \tau_\mu$$

В преобразователях регулятор тока представлен в следующем виде

$$W_{PC}(s) = k_p + k_i \frac{1}{s}$$

Выразим коэффициенты k_p и k_i через коэффициенты τ_{PC} и T_{PC} к

$$\frac{\tau_{PC} \cdot s + 1}{T_{PC} \cdot s} = \frac{\tau_{PC}}{T_{PC}} + \frac{1}{T_{PC}} \cdot \frac{1}{s}$$

Откуда находим

$$k_i = \frac{1}{T_{PC}} = \frac{J}{k_{km} \cdot \tau_\mu^2 \cdot 8}$$

$$k_p = \frac{t_{PC}}{T_{PC}} = \frac{J}{2 \cdot k_{km} \cdot \tau_\mu}$$

Вычислим значения устанавливаемых параметров преобразователя.

Базовые значения k_i и k_p в преобразователе должны быть настроены для работы с максимальным моментом инерции.

$$J_{max} := \mathbf{max}(JД) \quad J_{max} = 2.592 \times 10^3$$

$$J_{min} := \mathbf{min}(JД) \quad J_{min} = 2.461 \times 10^3$$

Первую точку адаптации выберем равной максимальному моменту инерции (100%). Вторую --- не используем.

Поскольку k_i и k_p зависит линейно от момента инерции, то нижние пороги k_i и k_p следует установить следующими

$$k_{i\%1} := \frac{J_{min}}{J_{max}} \quad k_{i\%1} = 0.949$$

$$k_{p\%1} := \frac{J_{min}}{J_{max}} \quad k_{p\%1} = 0.949$$

v max

Половину ширины области перехода коэффициентов следует установить равной

$$dJ_{1\%} := 1 - \frac{J_{min}}{J_{max}} \quad dJ_{1\%} = 5.054\%$$

Поскольку область перехода --- симметрична относительно первой точки адаптации, то верхние пороги установим на уровне

$$k_{i\%2} := 1 + \left(1 - \frac{J_{min}}{J_{max}} \right) \quad k_{i\%2} = 105.054\%$$

$$k_{p\%2} := 1 + \left(1 - \frac{J_{min}}{J_{max}} \right) \quad k_{p\%2} = 105.054\%$$

Поскольку все коэффициенты пропорциональны J_{min}/J_{max} , можно принять следующие значения с запасом

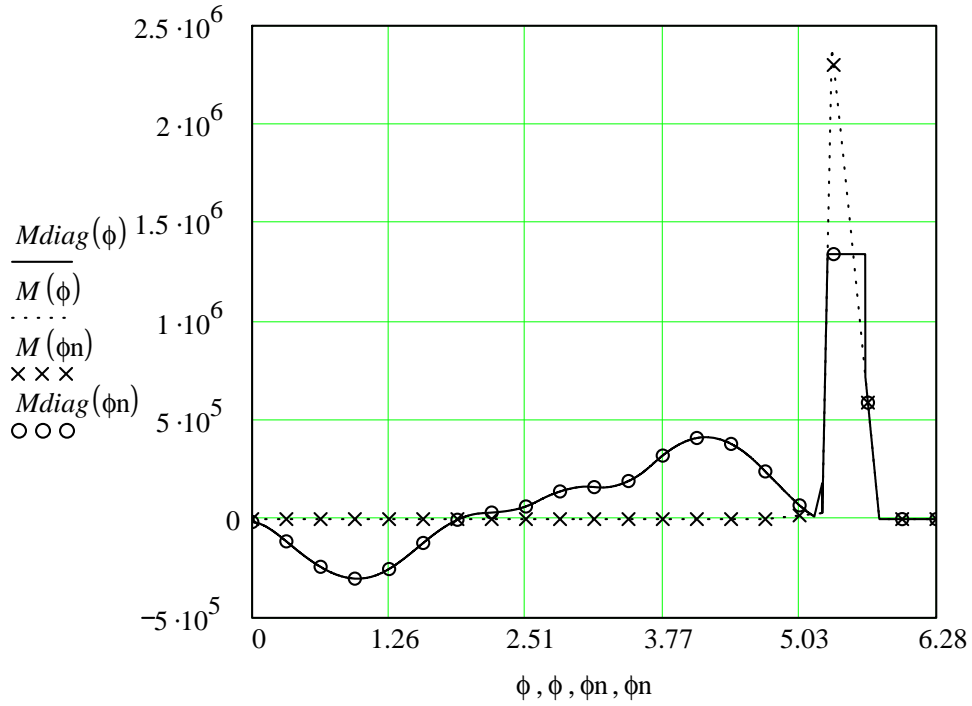
$$k_{i1\%} := 94.\% \quad k_{i2\%} := 106.\%$$

$$k_{p1\%} := 94.\% \quad k_{p2\%} := 106.\%$$

$$dJ_{1\%} := 6.\%$$

$$\phi := 0, 0.001 .. 2 \cdot p$$

$$\phi_n := 0, \frac{360}{20} \cdot \frac{p}{180} .. 360 \cdot \frac{p}{180}$$



$$i := 0 .. 20$$

$$A^{(i+1)} := \begin{pmatrix} i \cdot \frac{360}{20} \\ \frac{M\left(i \cdot \frac{2 \cdot p}{20}\right)}{M_{kpN}} \\ \frac{Mdiag\left(i \cdot \frac{2 \cdot p}{20}\right)}{M_{kpN}} \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 1 & 0 & 18 & 36 & 54 & 72 & 90 \\ \hline 2 & -6.666 \cdot 10^{-5} & -6.889 \cdot 10^{-5} & -5.25 \cdot 10^{-5} & 1.117 \cdot 10^{-6} & 3.336 \cdot 10^{-5} & 5.493 \cdot 10^{-5} \\ \hline 3 & -0.027 & -0.211 & -0.451 & -0.561 & -0.471 & -0.225 \\ \hline \end{array}$$

$$\frac{\max(M2)}{M_{\dots N}} = 4.454$$

Приложение 3. Исходные тексты файлов для пакета MatLab

В этом приложении приведены три скрипта для пакета MatLab. Первый скрипт выполняет подготовку MatLab'a для работы:

- объявляет глобальные переменные;
- вычисляет основные константы;
- загружает файлы данных, создаваемые файлом MathCad (см. приложение 2).

Исходный текст скрипта приведён ниже.

Содержание файла MLabPrepare.m

```
global s
global Rkr Vp dl k
global DJ2_2 F J2_2 Mc n
global w0 w1 f1

Rkr=0.7;
Vp=2.3;
k=1.075;
dl=2*Rkr*sin(pi/6);
f1=5/3*pi;
w0=(Vp/Rkr)/1.075;
w1=k*(Vp/Rkr)/0.96;

s='c:\work\tau_work\диплом'; % Путь к файлам данных
DJ2_2=load([s,'\DJ.dt']); % Загрузка файла данных
% производной момента инерции
% по углу поворота кривошипа
F=load([s,'\F.dt']); % Загрузка файла данных со
% значениями угла поворота
% кривошипа, для которых даны
% значения момента инерции,
% его производной и момента
% сопротивления
J2_2=load([s,'\J2_2.dt']); % Загрузка файла данных
% момента инерции механизма
Mc=load([s,'\Mc.dt']); % Загрузка файла данных
% момента сопротивления
% механизма.
```

Второй скрипт выполняет следующие функции

- вычисляет коэффициенты законов управления для заданной мерной длины с минимумом потерь и без него;

- ищет более оптимальные значения коэффициентов полинома закона с учётом переменных момента инерции и момента сопротивления;
- строит графики полученных законов;
- рассчитывает уменьшение потерь в процентах относительно закона управления без оптимизации.

Исходный текст скрипта приведён ниже.

Содержание файла DescrGraph

```
function Answer=DescrGraph(l,Epsel, NoFirstGraph);
% Функция строит графики законов управления ленточными
% ножницами в режиме регулирования мерной длины проката.
% Синтаксис: DescrGraph(l,Epsel, NoFirstGraph)
% l --- мерная длина заготовки;
% Epsel --- шаг изменения коэффициентов a9, a10 при
%           поиске оптимальных значений;
% NoFirstGraph --- номер первого графика(необязательно).

global Vp dl k Rkr
global DJ2_2 J2_2 Mc F
global w0 w1 f1
k123=301;
if nargin == 2
    NoFirstGraph=10;
elseif nargin == 3
else
    error('Неправильно заданы аргументы.');
```

```
end;

T1=(1-dl)/Vp;
A9A10=OptA9A10(f1, w0, w1, T1);
A0pt=CalcCoef(f1, w0, w1, T1, A9A10);
AZero=CalcCoef(f1, w0, w1, T1, [0 0]);
dt_=T1/100;
t_=zeros(101);
for i=1:101
    CalcAll_t1=CalcAll_t(A0pt,t_(i));
    Fi_tmp1(i)=CalcAll_t1(1);
    W_tmp1(i)=CalcAll_t1(2);
    E_tmp1(i)=CalcAll_t1(3);
    DE_tmp1(i)=CalcAll_t1(4);

    CalcAll_t1=CalcAll_t(AZero,t_(i));
    Fi_tmp2(i)=CalcAll_t1(1);
    W_tmp2(i)=CalcAll_t1(2);
    E_tmp2(i)=CalcAll_t1(3);
    DE_tmp2(i)=CalcAll_t1(4);
```

```

        if i<101
            t_(i+1)=t_(i)+dt_;
        end
    end

figure(NoFirstGraph);
plot(t_,Fi_tmp1,'k-',t_,Fi_tmp2,'k:');
title('График задания положения ножа');
xlabel('t, с');
ylabel('fi, рад');
hold on;

figure(NoFirstGraph+1);
plot(t_, W_tmp1,'k-',t_, W_tmp2,'k:', [0],[0]);
title('График задания скорости ножа');
xlabel('t, с');
ylabel('w, рад/с');
hold on;

figure(NoFirstGraph+2);
plot(t_,E_tmp1,'k-',t_,E_tmp2,'k:');
title('График ускорения ножа');
xlabel('t, с');
ylabel('e, рад/(с*с)');
hold on;

figure(NoFirstGraph+3);
plot(t_, DE_tmp1,'k-',t_, DE_tmp2,'k:');
title('График рывка ножа');
xlabel('t, с');
ylabel('de/dt, рад/(с*с*с)');
hold on;

IZ=FuncI2(AZero, k123, T1);
IOpt=FuncI2(AOpt, k123, T1);

VA9A10_=A9A10;
I1_=inf;
I1=IOpt;
Epsa9=VA9A10_(1)*Epsel; Epsa10=VA9A10_(2)*Epsel;

while (I1(1)<I1_(1))
    I1_(1)=I1(1);
    VA9A10=VA9A10_;
    A=CalcCoef(f1, w0, w1, T1, VA9A10+ [Epsa9, 0]);
    IReslt=FuncI2(A,k123,T1); DI1=I1(1)-IReslt(1);
    A=CalcCoef(f1, w0, w1, T1, VA9A10+ [0, Epsa10]);
    IReslt=FuncI2(A,k123,T1); DI2=I1(1)-IReslt(1);
    k1=sqrt(DI1(1)^2+DI2^2); da9=DI1(1)/k1; da10=DI2/k1;
end

```

```

    VA9A10_=(VA9A10+[da9*Epsa9, da10*Epsa10]);
    A=CalcCoef(f1, w0, w1, T1, VA9A10_);
    I1=FuncI2(A,k123,T1);
end

dt_=T1/100;
t_=zeros(101);
A=CalcCoef(f1, w0, w1, T1, VA9A10);

for i=1:101
    CalcAll_t1=CalcAll_t(A,t_(i));
    Fi_tmp1(i)=CalcAll_t1(1);
    W_tmp1(i)=CalcAll_t1(2);
    E_tmp1(i)=CalcAll_t1(3);
    DE_tmp1(i)=CalcAll_t1(4);
    if i<101
        t_(i+1)=t_(i)+dt_;
    end
end

figure(NoFirstGraph);
plot(t_,Fi_tmp1,'k--');
figure(NoFirstGraph+1);
plot(t_, W_tmp1,'k--');
figure(NoFirstGraph+2);
plot(t_,E_tmp1,'k--');
figure(NoFirstGraph+3);
plot(t_, DE_tmp1,'k--');

IVOpt=I1_(1);

Answer=[A9A10;VA9A10; IZ,0; IOpt, 0; IVOpt,0];

%*****
%*****
function Answer=OptA9A10(f1, w0, w1, T1);
W0=T1*w0;    W1=T1*w1;
a9=10/9*(-277*W1-290*W0+567*f1)/(T1^8);
a10=-70*(-W1-W0+2*f1)/(T1^9);
Answer=[a9, a10];

%*****
function Answer=CalcCoef(f1, w0, w1, T1, a9_10);

W0=T1*w0;    W1=T1*w1;
A9=a9_10(1)*T1^8;
A10=a9_10(2)*T1^9;

a(1)=0;

```



```

a(2)=w0;
a(3)=0;
a(4)=0;
a(5)=(-20*W0+A9+4*A10-15*W1+35*f1)/(T1^4);
a(6)=-(-45*W0+4*A9+15*A10-39*W1+84*f1)/(T1^5);
a(7)=2*(-18*W0+3*A9+10*A10-17*W1+35*f1)/(T1^6);
a(8)=-2*(-5*W0+2*A9+5*A10-5*W1+10*f1)/(T1^7);

A=[[a, a9_10]; [a, a9_10]; [a, a9_10]; [a, a9_10]];

B=ones(4,10);
for j=2:4
    for i=1:10
        if (i-j<0)
            B(j,i)=0;
        else
            B(j,i)=B(j-1,i)*(i-j+1);
        end;
    end;
end;
Answer=A.*B;

%*****
function Answer=CalcAll_t(a,t);

Answer(1)=sum((a(1,1:10).*[1 t t^2 t^3 t^4 t^5 t^6 t^7 t^8 t^9]));
Answer(2)=sum((a(2,1:10).*[0 1 t t^2 t^3 t^4 t^5 t^6 t^7 t^8]));
Answer(3)=sum((a(3,1:10).*[0 0 1 t t^2 t^3 t^4 t^5 t^6 t^7]));
Answer(4)=sum((a(4,1:10).*[0 0 0 1 t t^2 t^3 t^4 t^5 t^6]));

%*****
function Answer=FuncI2(a,n,T1);

global DJ2_2 F J2_2 Mc
dt=T1/(n-1);
t=0;
Mk=[0 0]; Jk=[0 0]; dJk=[0 0];
for i=1:n
    tmp=CalcAll_t(a,t);
    fi(i) =tmp(1);
    om2(i)=(tmp(2))^2;
    e(i) =tmp(3);
    Mk=CircInterpol(F, Mc, fi(i), Mk(2)); M(i)=Mk(1);
    Jk=CircInterpol(F, J2_2, fi(i), Jk(2)); J(i)=Jk(1);
    dJk =CircInterpol(F, DJ2_2, fi(i), dJk(2)); dJ(i)=dJk(1);
    i_(i)=(M(i)+e(i)*J(i)+om2(i)*dJ(i))^2;
    t=t+dt;
end
Answer=SimInt(dt,i_);

```

```

%*****
function Answer=CircInterpol(Xarr,Yarr,Xrequ, StepNo);

T=Xarr(end)-Xarr(1);
xrequ=Xrequ-T*floor((Xrequ-Xarr(1))/T);
if nargin==3
    i=2;
elseif nargin==4
    if StepNo==0
        i=2;
    else
        i=StepNo;
    end
end
if xrequ>=Xarr(1) & xrequ<Xarr(end)
    while (Xarr(i)<xrequ)
        i=i+1;
    end
    if nargin==3
        Answer=Yarr(i)+((Yarr(i)-Yarr(i-1))/(Xarr(i)-
            Xarr(i-1)))*(xrequ-Xarr(i));
    elseif nargin==4
        Answer=[Yarr(i)+((Yarr(i)-Yarr(i-1))/(Xarr(i)-
            Xarr(i-1)))*(xrequ-Xarr(i)), i];
    end
end

%*****
function Answer=SimInt(dx,y);

n=size(y); n=n(2);
Stp=1;
Answ=Integr(n,dx,y,Stp);
Answer=[Answ];

%*****
function AnswerR=Integr(n,dx,y,Stp)

d=Stp*dx;
if n/2 ~= round(n/2)
    Answ1=y(1)+y(n);
    Answ4=sum(y((Stp+1):(2*Stp):(n-1)));
    Answ2=sum(y((Stp+2):(2*Stp):(n-2)));
    AnswerR=(d/3)*(Answ1+2*Answ2+4*Answ4);
else
    n=n-1;
    Answ1=y(1)+y(n);
    Answ4=sum(y((Stp+1):(2*Stp):(n-1)));

```

```

    Answ2=sum(y((Stp+2):(2*Stp):(n-2)));
    Answer=(d/3)*(Answ1+2*Answ2+4*Answ4)+(y(end)+y(n))*d/2;
end

```

Третий скрипт выполняет следующие функции

- строит вычисляет и диаграмму момента двигателя для зоны регулирования для заданной мерной длины;
- сохраняет её для использования в файле MathCad'a приложение 2.

Исходный текст скрипта приведён ниже.

```

Содержание файла CalcDiogr.m
function Answer=CalcDiogr(l,NoFirstGraph);
% Функция рассчитывает диаграмму момента двигателя,
% приведённого к валу кривошипа
% Синтаксис DescrGraph(l,Epsel, NoFirstGraph)
% l --- мерная длина заготовки;
% NoFirstGraph --- номер графика (необязательно).

global s
global Vp dl k Rkr
global DJ2_2 J2_2 Mc F
global w0 w1 f1
if nargin == 1
    NoFirstGraph=10;
elseif nargin == 2
else
    error('Неправильно заданы аргументы.');
```

```

end;
T1=(l-dl)/Vp;
A9A10=OptA9A10(f1, w0, w1, T1);
A0pt=CalcCoef(f1, w0, w1, T1, A9A10);

Ikr=FuncI(A0pt,100,T1);
Ikr1=Ikr(:,2);
save 'c:\work\tau_work\практика\Mdiag.dt' Ikr1 -ascii;

Ikr1=Ikr(:,1);
save 'c:\work\tau_work\практика\Fdiag.dt' Ikr1 -ascii;

figure(NoFirstGraph);
plot(Ikr(:,1),Ikr(:,2),'k-');
title('Диаграмма момента на валу кривошипа');
xlabel('t, с');
ylabel('M, Н*м');
hold on;

```

```
Answer=[Ikr];
```

```
%*****
function Answer=OptA9A10(f1, w0, w1, T1);
W0=T1*w0;    W1=T1*w1;
a9=10/9*(-277*W1-290*W0+567*f1)/(T1^8);
a10=-70*(-W1-W0+2*f1)/(T1^9);
Answer=[a9, a10];
```

```
%*****
function Answer=CalcCoef(f1, w0, w1, T1, a9_10);
```

```
W0=T1*w0;    W1=T1*w1;
A9=a9_10(1)*T1^8;
A10=a9_10(2)*T1^9;
```

```
a(1)=0;
a(2)=w0;
a(3)=0;
a(4)=0;
a(5)=(-20*W0+A9+4*A10-15*W1+35*f1)/(T1^4);
a(6)=-(-45*W0+4*A9+15*A10-39*W1+84*f1)/(T1^5);
a(7)=2*(-18*W0+3*A9+10*A10-17*W1+35*f1)/(T1^6);
a(8)=-2*(-5*W0+2*A9+5*A10-5*W1+10*f1)/(T1^7);
```

```
A=[[a, a9_10]; [a, a9_10]; [a, a9_10]; [a, a9_10]];
```

```
B=ones(4,10);
for j=2:4
    for i=1:10
        if (i-j<0)
            B(j,i)=0;
        else
            B(j,i)=B(j-1,i)*(i-j+1);
        end;
    end;
end;
Answer=A.*B;
```

```
%*****
function Answer=CalcAll_t(a,t);
```

```
Answer(1)=sum((a(1,1:10).*[1 t t^2 t^3 t^4 t^5 t^6 t^7 t^8 t^9]));
Answer(2)=sum((a(2,1:10).*[0 1 t t^2 t^3 t^4 t^5 t^6 t^7 t^8]));
Answer(3)=sum((a(3,1:10).*[0 0 1 t t^2 t^3 t^4 t^5 t^6 t^7]));
```

```
%*****
```

```

function Answer=FuncI(a,n,T1);
global DJ2_2 F J2_2 Mc
dt=T1/(n-1);
t=0;
Mk=[0 0]; Jk=[0 0]; dJk=[0 0];
i_=zeros(2,n);
for i=1:n
    tmp=CalcAll_t(a,t);
    fi(i) =tmp(1);
    om2(i)=(tmp(2))^2;
    e(i) =tmp(3);
    Mk=CircInterpol(F, Mc, fi(i), Mk(2)); M(i)=Mk(1);
    Jk=CircInterpol(F, J2_2, fi(i), Jk(2)); J(i)=Jk(1);
    dJk =CircInterpol(F, DJ2_2, fi(i), dJk(2)); dJ(i)=dJk(1);
    i_(i,2)=[M(i)+e(i)*J(i)+om2(i)*dJ(i)];
    i_(i,1)=[fi(i)];
    % i_(i,1)=[t];
    t=t+dt;
end
Answer=i_;

%*****
function Answer=CircInterpol(Xarr,Yarr,Xrequ, StepNo);

T=Xarr(end)-Xarr(1);
xrequ=Xrequ-T*floor((Xrequ-Xarr(1))/T);

if nargin==3
    i=2;
elseif nargin==4
    if StepNo==0
        i=2;
    else
        i=StepNo;
    end
end
if xrequ>=Xarr(1) & xrequ<Xarr(end)
    while (Xarr(i)<xrequ)
        i=i+1;
    end
    if nargin==3
        Answer=Yarr(i)+((Yarr(i)-Yarr(i-1))/(Xarr(i)-
            Xarr(i-1)))*(xrequ-Xarr(i));
    elseif nargin==4
        Answer=[Yarr(i)+((Yarr(i)-Yarr(i-1))/(Xarr(i)-
            Xarr(i-1)))*(xrequ-Xarr(i)), i];
    end
end
end
-----

```

Приложение № 4. Расчёт заземления.

Удельное сопротивление грунта $\rho := 0.2 \cdot 10^4$ Ом·см

Максимально допустимое сопротивление $R_{\text{дон}} := 0.5$ Ом

Длина заземлителя $l := 300$ см

Расстояние между заземлителями $a := 3 \cdot l \rightarrow 900$ см

Глубина залегания заземлителя $h := 100$ см

Диаметр заземлителя (трубы) $d := 5$ см

Ширина полосы заземления $b := 10$ см

Расстояние от поверхности до середины заземлителя $t := h + \frac{l}{2}$
 $t = 250$ см

Сопротивление растеканию тока одиночного заземлителя

$$R_{mp} := \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot l}{d} \right) + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right) \quad R_{mp} = 5.408 \quad \text{Ом}$$

Приближенное число заземлителей

$$n' := \frac{R_{mp}}{R_{\text{дон}}} \quad n' = 10.816$$

Принимаем $n' := 11$

По графику находим коэффициент использования $\eta_{\text{тр}} := 0.75$

Рассчитываем число заземлителей с учётом коэффициента использования

$$n := \frac{R_{mp}}{R_{\text{дон}} \cdot \eta_{\text{тр}}} \quad n = 14.422$$

Окончательно примем число заземлителей $n := 14$

Длина металлической полосы, связывающей заземлители

$$L := 1.05 \cdot a \cdot n \quad L = 1.323 \times 10^4 \quad \text{см}$$

Сопротивление полосы протеканию тока

$$R_n := \frac{\rho}{2 \cdot p \cdot L} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot L^2}{b \cdot h} \right) \quad R_n = 0.307 \quad \text{Ом}$$

Коэффициент использования полосы находим по графику

$$\eta_{\Pi} := 0.52$$

Окончательно рассчитываем общее сопротивление заземления

$$R_{\text{общ}} := \frac{R_n \cdot R_{\text{мп}}}{n \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot R_n + R_{\text{мп}} \cdot \eta_{\Pi}} \quad R_{\text{общ}} = 0.275 \quad \text{Ом}$$

Приложение № 5. Пример идентификации.

Рассмотрим пример идентификации звена в пакете Matlab. На рис. 1. приведена исследуемая схема.

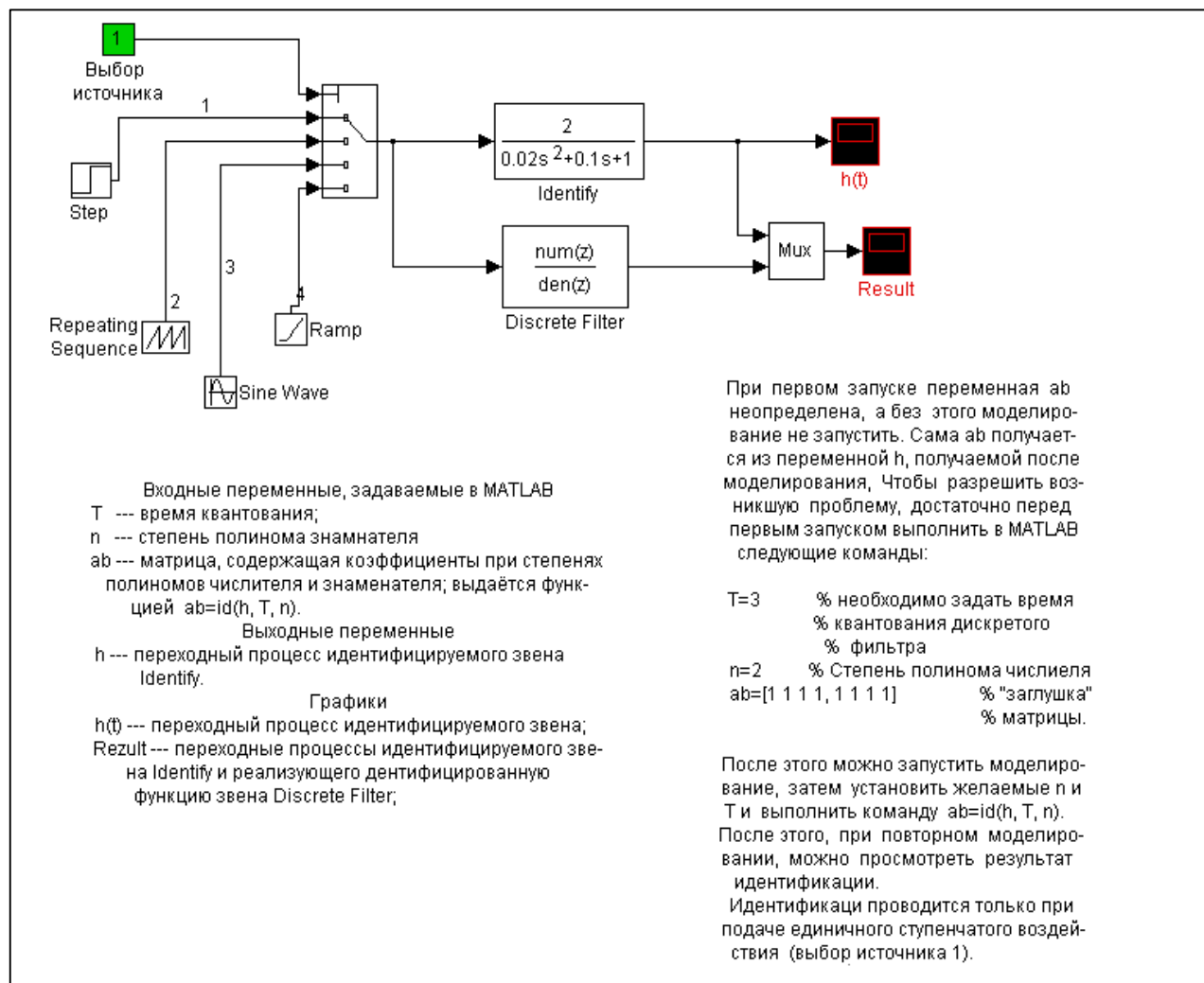


Рис. 1. Исследуемая схема

На схеме обозначены 'Identify' – идентифицируемое звено $W(s)$, 'Discrete Filter' – дискретный фильтр, реализующий передаточную функцию $W(z)$, соответствующую $W(s)$.

Параметры звена Identify изображены на рис. 2. Эти параметры соответствуют

$$\text{передаточной функции } W_o(s) = \frac{2}{0,02s^2 + 0,1s + 1}$$

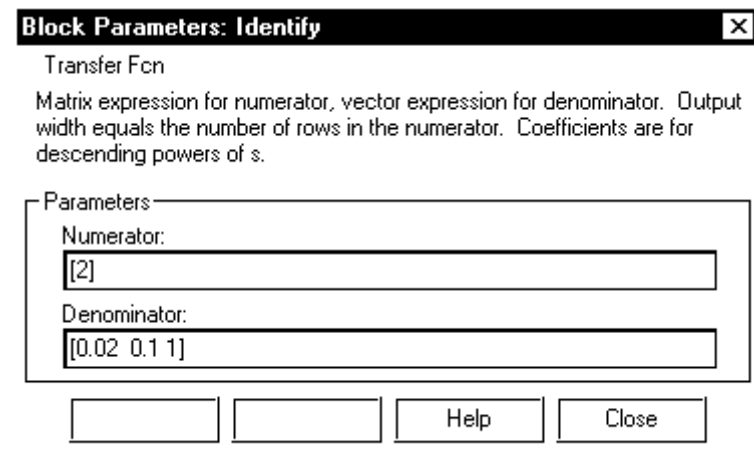


Рис. 2. Параметры звена 'Identify'.

Параметры звена 'Discrete Filter' представлены на рис. 3. Эти параметры соответствуют

передаточной функции $W_o(z) = \frac{\sum_{i=1}^{n+2} ab(1,i) \cdot z^{-(i-1)}}{\sum_{i=1}^{n+2} ab(2,i) \cdot z^{-(i-1)}}$. Здесь $n+2$ – число столбцов в матрице ab ; n

– степень полинома числителя; $ab(1,i)$ и $ab(2,i)$ – массивы коэффициентов полиномов числителя и знаменателя; T – время квантования.

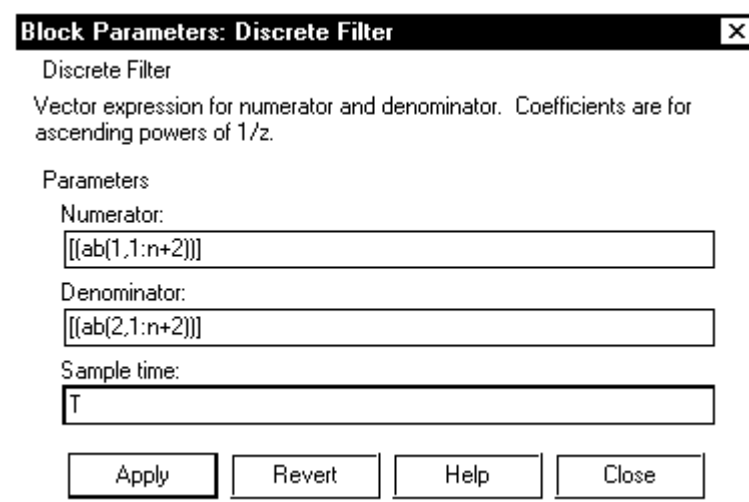


Рис. 3. Параметры звена 'Discrete Filter'.

Идентификация проводится по массиву h , выводимому через Sinks\Scope $h(t)$. При этом надо учесть, что для запуска моделирования переменные n , T и ab должны быть определены, иначе моделирование не запустится. Поэтому, перед первым запуском моделирования переменным ab , n и T задаются некоторые произвольные значения, надо, однако, учитывать, что ab должна быть матрицей с размерностью $[2 \times n + 2]$.

Для качественной идентификации необходимо, чтобы точки снимались как можно точнее, поэтому при расчёте переходного процесса был установлен максимальный шаг интегрирования 0,01 с.

Ниже приведён пример начала сеанса в Matlab'e

```
-----  
» T=0.05;  
» n=1;  
» ab=[1 1 1; 1 1 1]  
ab =  
  
      1      1      1  
      1      1      1
```

После этого можно запустить на моделирование схему рис. 1. В результате моделирования в рабочем пространстве (WorkSpace) будет сохранена переменная h , содержащая переходный процесс идентифицируемого звена. Сам переходный процесс изображён на рис. 4.

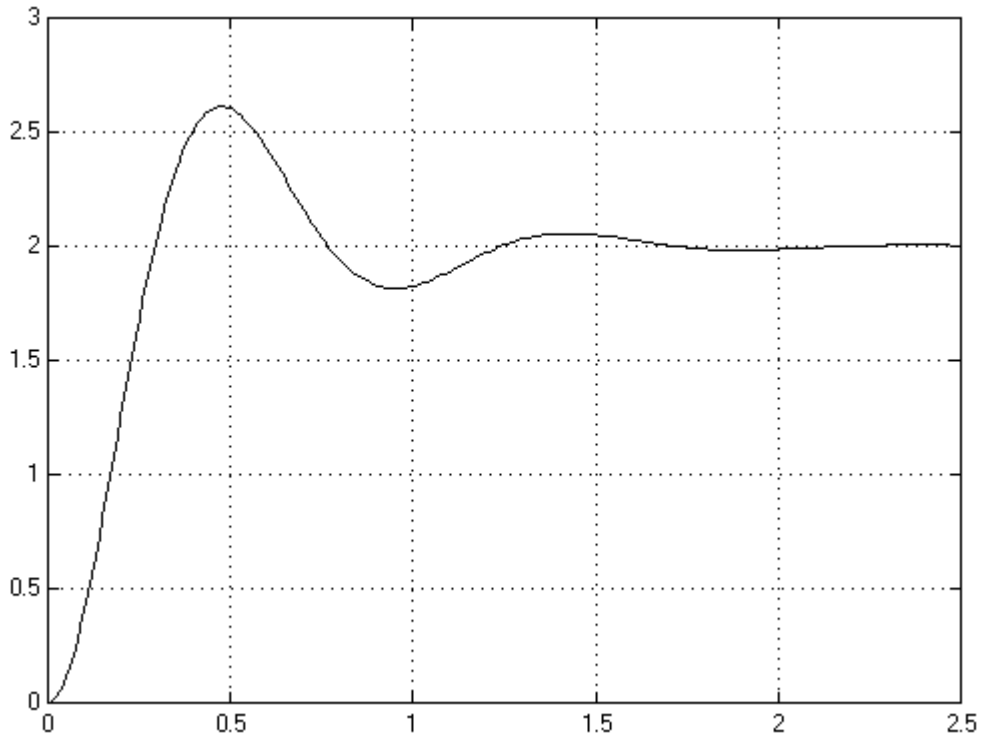


Рис. 4. Переходный процесс идентифицируемого звена.

Теперь можно выполнить идентификацию. Пример сеанса приведён ниже

```
» n=3; %
```

```
» ab=id(h,T,n,26) % 1)
```

```
ab =
```

```

      0      0.1139      0.1162      0.0104      0.0000
1.0000 -1.5704      0.6135      0.0771      0
```

1)(n+2)+26 номер первого такта, с которого начинается расчёт коэффициентов полинома знаменателя $W_0(z)$.

После этого переменная *ab* содержит массивы коэффициентов числителя и знаменателя идентифицирующей функции. Теперь можно проверить качество идентификации. Промоделируем схему рис. 1 ещё раз. Переходный процесс исходного звена и его дискретной модели приведён на рис. 5.

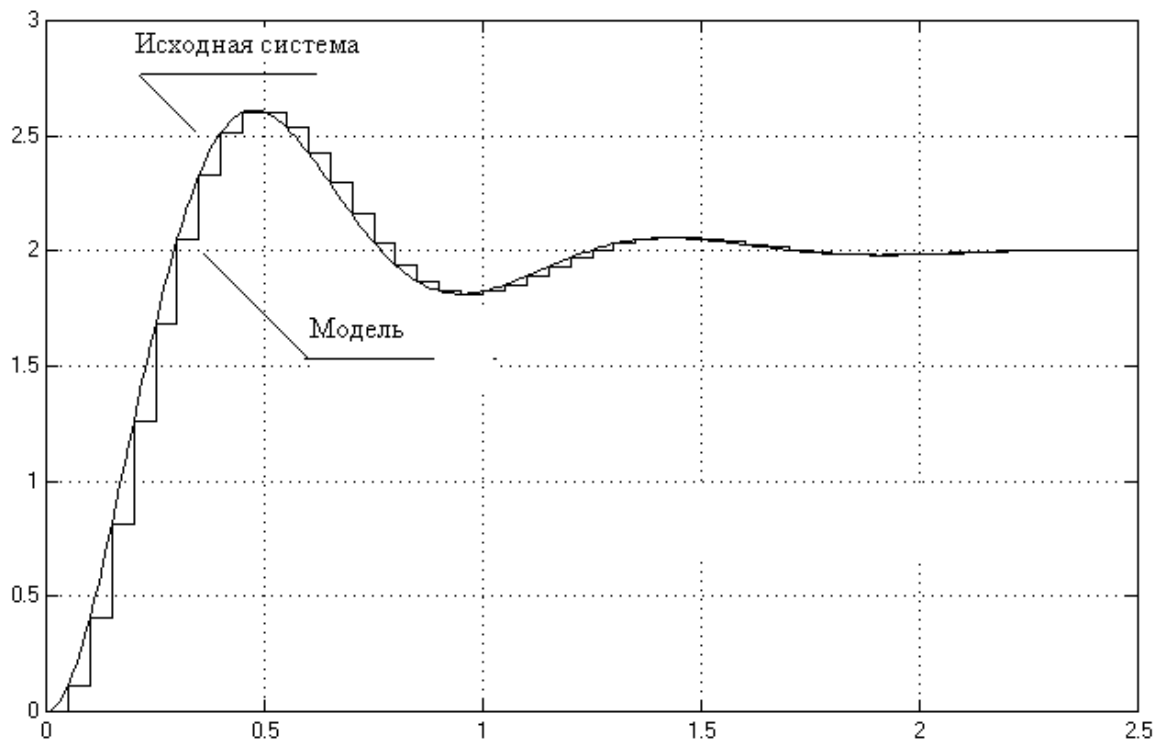


Рис. 5. Переходные процессы идентифицируемой системы и дискретной модели этой системы.

Приложение №6. Настройка параметров преобразователя.

Параметр	ед. изм.	№	Установленное значение	Пояснения
<i>Reg parameters\Base values\Speed regulator</i>				
Speed P Base	А/(об/мин)	93	Должен быть настроены на максимальный момент инерции	Базовое значение пропорциональной составляющей ПИ–регулятора скорости
Speed I Base	А/(об/мин)·мс	94	Должен быть настроены на максимальный момент инерции	Базовое значение интегральной составляющей ПИ–регулятора скорости
<i>ADD Speed funct\Adaptive speed reg</i>				
Enablespd adap	En/ Des	181	Enable	Разрешить адаптацию
Select adap type	Spd/ Adpt Ref	182	Adap reference	Адаптция от внешней переменной
Adap refrence	FF	183	Момент расчётный инерции в % от максимального	Внешняя переменная, по которой производится адаптация
Adap speed 1	%	184	100	Первая точка адаптации
Adap speed 2	%	185	150(не используется)	Вторая точка адаптации
Adap joint 1	%	186	6	
Adap joint 2	%	187	0	
Adap P gain 1	%	188	94	Процент от <i>Speed P base</i> .
Adap I gain 1	%	189	94	Процент от <i>Speed I base</i> .
Adap P gain 2	%	190	106	Процент от <i>Speed P base</i> .
Adap I gain 2	%	191	106	Процент от <i>Speed I base</i> .

Параметр	ед. изм.	№	Установленное значение	Пояснения
<i>Limits\Speed limits\speed amount; ..\speed min/max</i>				
Speed min amount	FF	1	0	Минимальная скорость (в обоих направлениях)
Speed max amount	FF	2	200	Максимальная скорость (в обоих направлениях)
Speed min pos	FF	5	0	Минимальная скорость (по ч. с.)
Speed max pos	FF	3	200	Максимальная скорость (по ч.с.)
Speed min neg	FF	6	0	Минимальная скорость (против ч. с.)
Speed max neg	FF	4	200	Максимальная скорость против ч. с.
<i>Ramp\acceleration; Ramp\deceleration; Ramp\Quick stop</i>				
Acc delta speed	FF	21	10	Любое значение, всё равно не используется
Acc delta time	s	22	0	Т. к. датчик интенсивности не используется
Dec delta speed	FF	29	10	Любое значение, всё равно не используется
Dec delta time	s	30	0	Т. к. датчик интенсивности не используется
Qstp delta speed	FF	37	10	Любое значение, всё равно не используется
Qstp delta time	s	38	0	Т. к. датчик интенсивности не используется
<i>Configuration\Speed fbk</i>				
Motor nom speed	об/мин	162	200	Максимальное значение скорости
Speed fbk sel		414	Encoder 2	Цифровой энкодер, подключаемый к ХЕ2.
Enable fbk contr		457	Disabled	Отключить контроль ОС
Enable fbk bypas		458	Disabled	Отключить автоматический переход на регулирование по ЭДС
Encoder 2 pulses		169	1024	Число пульсаций на оборот

Параметр	ед. изм.	№	Установленное значение	Пояснения
<i>Speed regulat\droop function</i>				
Enable droop		699	Enable	Разрешить распределене нагрузки
<i>Speed regulat</i>				
Speed reg output		236	Enabled	Разрешить выход ПИ-регулятора скорости
Lock speed reg	on/off	322	off	Разрешить работу ПИ-регулятора
Enable spd reg	En/Des	242	Enabled	Подключить выход ПИ-регулятора РС ко входу РТ
Lock speed I		348	Not Active	Разрешить работу И-составляющей РС
<i>Current Regulat</i>				
R&L search	on/off	452		Запуск процедуры определения параметров якорной цепи (R и L).
<i>Functions\Overload contr</i>				
Enable overload	En/ Des	309	Enabled	Перегрузка разрешена
Overload mode		405	Curr limited	Максимально допустимый ток двигателя ограничен
Overload current	%	312	200	Максимально допустимый ток в % от Full load cur.
Base Current	%	313	100	Ток после окончания пергрузки (в % от Full load cur)
Overload time	с	310	15	Максимально допустимое время пергрузки
<i>Configuration</i>				
Speed base value	FF	45	200 об/мин	Базовое значение скорости
Full load curr	A	179	1500	Ток, принятый за 100%.
Max out voltage	B	175	850	Максимальное напряжение якоря

Параметр	ед. изм.	№	Установленное значение	Пояснения
<i>Limits\Flux limits</i>				Установки регулятора потока
Flux current max	%	467	100	Максимальный (в % от номинального) поток
Flux current min	%	468	100	Минимальное значение (в % от максимального)
<i>Limits\Current limits</i>				
T current limit	%	7	200	Устанавливает симметрично ограничение тока в обоих направлениях
<i>Flux Reg</i>				
Enable flux reg	On/ Off	497	on	Разрешить работу преобразователя тока возбуждения
Flux reg mode		469	Constant current	Двигатель работает с постоянным потоком
Enable flux weak	On/ Off	498	off	Команда ослабления потока до минимального значения
Speed-0 weak	On/ Off	499	On	Когда скорость снижается до нуля — ослабить поток.
Nom flux curr	A	374	22,4	Номинальный выходной ток регулятора потока
Motor nom flux	A	280	22,4	Номинальный ток возбуждения подключённого двигателя