

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ОДНИМ ЧИСЛОМ НА ПОЛЮС И ФАЗУ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ В MATLAB

В работах [1], [2] и [3] показаны возможности использования магнитных и электрических схем замещения при исследовании линейных асинхронных двигателей с шунтирующими зонами по краям индуктора. В данной работе используем магнитные схемы замещения для математического моделирования асинхронного двигателя. На рисунке 1 а показана линейная развертка кругового асинхронного двигателя с одной парой полюсов ($2p = 2$) и с одним числом пазов на полюс и фазу ($q = 1$).

На рисунке 1б дана его магнитная схема замещения, где токи и потоки на входе двигателя являются соответствующими токами и потоками на его выходе. Представление асинхронного двигателя в виде магнитных схем замещения приводит к необходимости работать с матрицами, что представляет собой большую ценность для подготовки студентов к исследовательской работе. Так как данная работа адресована студентам, то наибольшее внимание уделено способу изложения материала. Запишем основные уравнения для « n »-ого участка схемы замещения.

Баланс магнитных напряжений магнитной цепи

Φ_{n-}, Φ_{n+} – контурные магнитные потоки;

R_{n-}, R_{n+} – магнитные сопротивления воздушных участков;

$F_n^S = \dots$ – магнитодвижущая сила, созданная статорным током i_n^S , протекающим по всем проводникам паза (ω_n);

$F_n^S = \dots$ – в шунтирующих зонах;

$F_n^R = \dots$ – М.Д.С. тока ротора в стержне ($\omega_n = \dots$).

Баланс М.Д.С. для « n »-го участка имеет следующий вид:

$$F_n^S + \dots = \dots + \dots - \dots - \dots$$

Отсюда ток в стержне ротора определится по следующему выражению:

$$i_n^R = - \dots - \dots + \dots + \dots - \dots \quad (1)$$

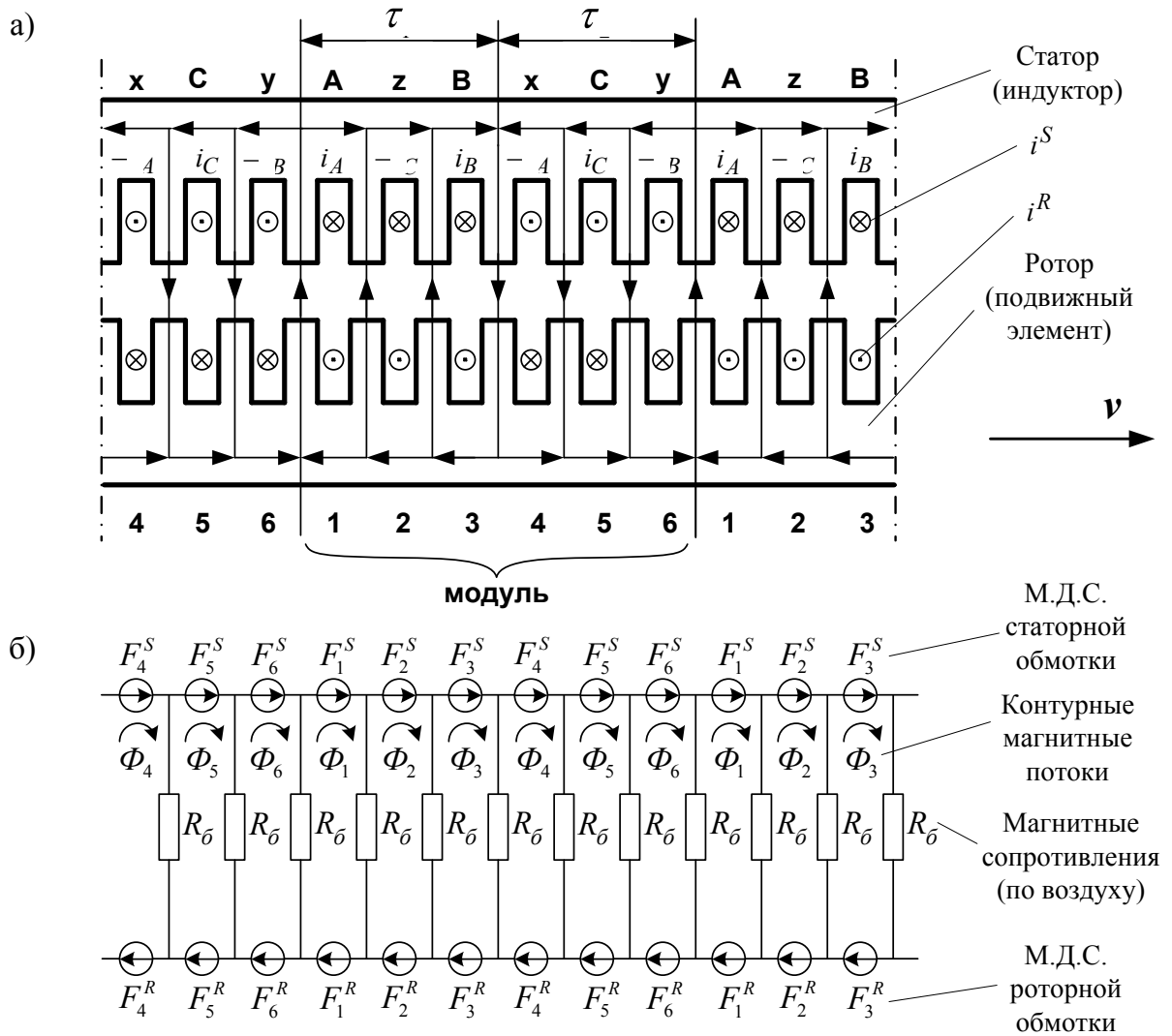


Рис. 1. а) Асинхронный двигатель ($2p=2, q=1$)
 б) Магнитная схема замещения

Уравнение баланса напряжений электрической цепи ротора

$$r^r \cdot \dots + \dots \frac{\partial}{\partial} + \dots \frac{\partial}{\partial} - \dots \frac{\partial}{\partial} - \dots \frac{\partial}{\partial} \quad (2)$$

Выразим производные во времени через конечные разности:

$$\frac{\partial}{\partial} - \Delta \quad \frac{\partial}{\partial} - \Delta$$

где n – номер зубцового деления;

k – номер шага разбиения по времени.

В формуле (2) скорость подвижного элемента принимаем равным $v = \dots$ и в пределах « k » интервала считается постоянным.

Производные по пространственной координате « x » выразим через центральные конечные разности:

$$\frac{\partial}{\partial t} \dots - \dots \frac{\partial}{\partial t} \dots$$

С учетом вышеприведенных замечаний уравнение (2) примет следующий вид:

$$r^r \cdot \dots + \dots \Delta \dots - \dots \Delta \dots \quad (3)$$

Исключим из уравнения (3) токи в роторе. Для этого подставим выражение (1) в уравнение (3) и получим:

$$\begin{aligned} & \left[\dots \right] + \left[\dots \right] + \left[\dots \right] + \left[\dots \right] \\ & = \left[\dots \right] \left[\dots \right] \left[\dots \right] \left[\dots \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Это уравнение может быть реализовано при произведении матрицы **A**, элементы которой записаны в квадратных скобках, на матрицу-столбец из потоков (Φ) и токов статорной обмотки. Правая часть уравнения (4) формирует матрицу-столбец **S** из свободных членов в ($k-1$) момент времени. Матрица-столбец **X** сформирована из первых шести элементов, которые соответствуют потокам, а с 7 по 9 – токам i_A, i_B, i_C . Общий вид матриц при числе пазов на полюс и фазу $q = 1$ и числе полюсов $2p = 2$ примет следующий вид:

Матрица A	\times	Матрица X	=	Матрица S
$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & 0 & a_{1,5} & a_{1,6} & a_{1,7} & a_{1,8} & a_{1,9} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} & 0 & a_{2,6} & a_{2,7} & a_{2,8} & a_{2,9} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & a_{3,4} & a_{3,5} & 0 & a_{3,7} & a_{3,8} & a_{3,9} \\ 0 & a_{4,2} & a_{4,3} & a_{4,4} & a_{4,5} & a_{4,6} & a_{4,7} & a_{4,8} & a_{4,9} \\ a_{5,1} & 0 & a_{5,3} & a_{5,4} & a_{5,5} & a_{5,6} & a_{5,7} & a_{5,8} & a_{5,9} \\ a_{6,1} & a_{6,2} & 0 & a_{6,4} & a_{6,5} & a_{6,6} & a_{6,7} & a_{6,8} & a_{6,9} \\ a_{7,1} & 0 & a_{7,3} & a_{7,4} & 0 & a_{7,6} & a_{7,7} & 0 & a_{7,9} \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} x_1 = \Phi_1 \\ x_2 = \Phi_2 \\ x_3 = \Phi_3 \\ x_4 = \Phi_4 \\ x_5 = \Phi_5 \\ x_6 = \Phi_6 \\ x_7 = i_A \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \\ s_7 \end{bmatrix}$

Уравнение (6) позволит определить для первых шести строк элементы матрицы A и с первой по шестой элементы матрицы-столбца S, для этого последовательно зададимся n .

$n = 1$. В соответствии с рис. 1 $i_{n-}^s = - \dots = - \dots$. В матрице X току i_B соответствует элемент столбца x_9 , в котором нет информации о начале обмотки или его конце. Условно в начале обмотки принимаем знак «+», а в конце «-». Соответствующие знаки необходимо учесть в другой матрице, а именно в A.

$$a_{1,9} \cdot \dots = \dots - \dots = \dots \cdot \dots$$

далее знак из матрицы X перенесем в элемент матрицы A:

$$a_{1,9} \cdot \dots \cdot \dots$$

Возвращаясь к уравнению (6) в квадратных скобках формируются элементы строки матрицы A при $n = 1$, которые перемножаются на соответствующие элементы матрицы X:

$$\begin{aligned} & \left[\underbrace{\quad}_{a_{1,9}} \right] x_9 - \left[\underbrace{\quad}_{a_{1,7}} \right] x_7 + \left[\underbrace{\quad}_{a_{1,8}} \right] x_8 - \left[\underbrace{\quad}_{a_{1,5}} \right] x_5 + \left[\underbrace{\quad}_{a_{1,6}} \right] x_6 + \left[\underbrace{\quad}_{a_{1,1}} \right] x_1 + \left[\underbrace{\quad}_{a_{1,2}} \right] x_2 + \left[\underbrace{\quad}_{a_{1,3}} \right] x_3 = \\ & = \underbrace{\quad + \quad + \quad + \quad}_{S_1} \end{aligned}$$

Запишем элементы матрицы A:

$$a_{1,1}=B; \quad a_{1,2}=C; \quad a_{1,3}=D; \quad a_{1,5}=-D; \quad a_{1,6}=E; \quad a_{1,7}=Y; \quad a_{1,8}=T(-1); \quad a_{1,9}=(-T)(-1);$$

В правой части сформирован элемент s_1 матрицы-столбца S:

$$s_1 = \dots + \dots + \dots + \dots$$

$n = 2$.

$$\begin{aligned} & - \left[\underbrace{\quad}_{a_{2,7}} \right] x_7 + \left[\underbrace{\quad}_{a_{2,8}} \right] x_8 - \left[\underbrace{\quad}_{a_{2,9}} \right] x_9 + \left[\underbrace{\quad}_{a_{2,6}} \right] x_6 + \left[\underbrace{\quad}_{a_{2,1}} \right] x_1 + \left[\underbrace{\quad}_{a_{2,2}} \right] x_2 + \left[\underbrace{\quad}_{a_{2,3}} \right] x_3 + \left[\underbrace{\quad}_{a_{2,4}} \right] x_4 = \\ & = \underbrace{\quad + \quad + \quad}_{S_2} \end{aligned}$$

Запишем элементы матрицы A:

$$a_{2,1}=E; \quad a_{2,2}=B; \quad a_{2,3}=C; \quad a_{2,4}=D; \quad a_{2,6}=-D; \quad a_{2,7}=-T; \quad a_{2,8}=Y \cdot (-1); \quad a_{2,9}=T.$$

В правой части сформирован элемент s_2 матрицы-столбца S:

$$s_2 = \left[\quad \right] \cdot \dots + \dots + \dots$$

$n = 3$.

$$\begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} + \dots + \dots + \dots + \dots + \dots = \dots + \dots + \dots + \dots$$

Запишем элементы матрицы A:

$$a_{3,1}=-D; \quad a_{3,2}=E; \quad a_{3,3}=B; \quad a_{3,4}=C; \quad a_{3,5}=D; \quad a_{3,7}=T \cdot (-1); \quad a_{3,8}=-T \cdot (-1); \\ a_{3,9}=Y.$$

В правой части сформирован элемент s_3 матрицы-столбца S:

$$s_3 = \dots + \dots + \dots + \dots$$

$n = 4.$

$$- \dots + \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} + \dots + - \dots + \dots + \dots + \dots + \dots = \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} + \dots + \dots + \dots$$

Запишем элементы матрицы A:

$$a_{4,2}=-D; \quad a_{4,3}=E; \quad a_{4,4}=B; \quad a_{4,5}=C; \quad a_{4,6}=D; \quad a_{4,7}=Y \cdot (-1); \quad a_{4,8}=T; \quad a_{4,9}=-T.$$

В правой части сформирован элемент s_4 матрицы-столбца S:

$$s_4 = \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} + \dots + \dots + \dots$$

$n = 5.$

$$\begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} + \dots + \dots + \dots + \dots + \dots = \dots + \dots + \dots + \dots$$

Запишем элементы матрицы A:

$$a_{5,1}=D; \quad a_{5,3}=-D; \quad a_{5,4}=E; \quad a_{5,5}=B; \quad a_{5,6}=C; \quad a_{5,7}=-T \cdot (-1); \quad a_{5,8}=Y; \quad a_{5,9}=T \cdot (-1)=-T.$$

В правой части сформирован элемент s_5 матрицы-столбца S:

$$s_5 = \dots + \dots + \dots + \dots$$

$n = 6.$

$$- \dots + \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} + \dots + - \dots + \dots + \dots + \dots + \dots = \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} + \dots + \dots + \dots$$

Запишем элементы матрицы A:

$$a_{6,1}=C; \quad a_{6,2}=D; \quad a_{6,4}=-D; \quad a_{6,5}=E; \quad a_{6,6}=B; \quad a_{6,7}=T; \quad a_{6,8}=-T; \quad a_{6,9}=Y \cdot (-1)=-Y.$$

В правой части сформирован элемент s_6 матрицы-столбца S:

$$s_6 = \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} + \dots + \dots + \dots$$

Элементы седьмой и восьмой строк матрицы A и элементы s_7 и s_8 матрицы-столбца S формируются из баланса напряжения электрической цепи

статорной обмотки. Если обмотка индуктора питается от трехфазного напряжения с соединением в «звезду» без нулевого провода, то

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \dots + \dots + \dots + \dots + \dots \\ \frac{d}{dt} \dots + \dots + \dots + \dots + \dots \end{cases} \quad (7)$$

где $U_{AB} = \dots + \dots$ $U_{BC} = \dots$ $U_{AB} + \dots + \dots =$

С учетом шага по времени Δt в k -ый момент времени:

$$\begin{cases} \dots - \dots \cdot \Delta + \\ \dots - \dots \cdot \Delta \end{cases}$$

Уравнения (7) при выражении производных по времени через конечные разности примут следующий вид:

$$\begin{aligned} U \cdot \dots + \dots \cdot \dots + \dots \cdot \dots + \dots \cdot \dots + \dots \cdot \dots + \dots \cdot \dots + \dots \cdot \dots \\ = \dots \cdot \dots - \dots - \dots + \dots + \dots \end{aligned}$$

где $U = \dots \Delta$

В квадратных скобках сформированы элементы матрицы **A** для седьмой строки:

$$a_{7,1}=U; \quad a_{7,3}=-U; \quad a_{7,4}=-U; \quad a_{7,6}=U; \quad a_{7,7}=KS=r^s+L^s/\Delta t; \quad a_{7,9}=-KS=-(r^s+L^s/\Delta t);$$

Правая часть определила элемент s_7 матрицы-столбца **S**.

Аналогично для второго уравнения (7) определим элементы восьмой строки матрицы **A** и элемент s_8 матрицы **S**:

$$\begin{aligned} U \cdot \dots + \dots \cdot \dots + \dots \cdot \dots + \dots \cdot \dots + \dots \cdot \dots + \dots \cdot \dots + \dots \cdot \dots \\ = \dots \cdot \dots + \dots - \dots + \dots \end{aligned}$$

$$a_{8,2}=U; \quad a_{8,3}=U; \quad a_{8,5}=-U; \quad a_{8,6}=-U; \quad a_{8,8}=-KS=r^s+L^s/\Delta t; \quad a_{7,9}=KS=-(r^s+L^s/\Delta t);$$

Правая часть определила элемент s_8 матрицы-столбца **S**.

Наконец, сумма токов определяет элементы девятой строки матрицы **A** и элемент s_9 матрицы-столбца **S**.

$$\underbrace{1}_{a_{9,7}} \cdot \dots + \underbrace{\dots}_{a_{9,9}} \cdot \dots + \underbrace{\dots}_{a_{9,8}} \cdot \dots = \vec{s}_9$$

Окончательно, матрица **A** примет следующий вид, удобный для программирования в MatLab:

$$A = \begin{vmatrix} B & C & D & 0 & -D & E & Y & -T & T \\ E & B & C & D & 0 & -D & -T & -Y & T \end{vmatrix}$$

$$\begin{array}{c|cccccc|ccc}
 & -D & E & B & C & D & 0 & -T & T & Y \\
 & 0 & -D & E & B & C & D & -Y & T & -T \\
 & D & 0 & -D & E & B & C & T & Y & -T \\
 & C & D & 0 & -D & E & B & T & -T & -Y \\
 \hline
 & U & 0 & -U & -U & 0 & U & KS & 0 & -KS \\
 & 0 & U & U & 0 & -U & -U & 0 & -KS & KS \\
 \hline
 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1
 \end{array}$$

Неизвестные переменные (потоки и токи в статорной обмотке) в k -ый момент времени определяется в результате следующей операции с матрицами:

$$X = A^{-1} \cdot S,$$

Далее, подставляя в уравнение (1) $n = 1 \dots 6$, определяем токи в роторе:

$$\begin{aligned}
 i_1^R &= - \dots - \dots + \dots - \dots \\
 i_2^R &= - \dots - \dots - \dots + \dots - \dots \\
 i_3^R &= - \dots - \dots + \dots - \dots \\
 i_4^R &= - \dots - \dots - \dots + \dots - \dots \\
 i_5^R &= - \dots - \dots + \dots - \dots \\
 i_6^R &= - \dots - \dots - \dots + \dots - \dots
 \end{aligned}$$

Электромагнитные усилия на зубцовом делении определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \dots \\
 F_2 &= \dots \\
 F_3 &= \dots \\
 F_4 &= \dots \\
 F_5 &= \dots \\
 F_6 &= \dots
 \end{aligned}$$

Суммарное усилие: $F_{\Sigma} = \sum_{n=1}^6$

Скорость в k -ый момент времени: $v_k = \dots + \frac{F}{m} \cdot \Delta$

Произведем построение математической модели асинхронного двигателя методом Гаусса-Жордана с использованием языка программирования MatLab. Ниже приведен пример кода:

```
function AD3
% Исходные данные линейного асинхронного двигателя
Rb=0.1003*10^7;
rs=19/2;
Ls=0.074/2;
rr=4.6345*10^-5;
Lr=0.0372*10^-5;
dt=0.001;
tz=9.769*10^-3;
m=0.95;
v0=0;
wn=200;
f=50;
w=2*pi*f;
U=wn/dt;
Um=155;
X=zeros(9,1);
F=0;
K=input('длительность цикла k=');

for k=1:(K+1)
    v(1,k)=v0;          % Создание вектор-строки для графика скорости
    f(1,k)=sum(F);      % Создание вектор-строки для графика усилия
    Uab=Um*cos(w*(k-1)*dt+2*pi/3);
    Ubc=Um*cos(w*(k-1)*dt);
    % Создание матрицы A
    A=zeros(9);
    B=2*Rb*(rr+Lr/dt)+1/dt;
    C=-Rb*(rr+Lr/dt)+(2*Rb*Lr+1)*v0/(2*tz);
    D=-Rb*Lr*v0/(2*tz);
    E=-Rb*(rr+Lr/dt)-(2*Rb*Lr+1)*v0/(2*tz);
    T=-wn*Lr*v0/(2*tz);
    Y=-wn*(rr+Lr/dt);
```

```

W1=-wn*Lr/dt;
P=-Rb*Lr/dt;
Q=(2*Rb*Lr+1)/dt;
KS=rs+Ls/dt;

% MampuuA A
for n=1:6
    A(n,n)=B;
end;
for n=1:5
    A(n,n+1)=C;
    A(n+1,n)=E;
end;
for n=1:4
    A(n,n+2)=D;
    A(n+2,n)=-D;
end;
for n=1:2
    A(n,n+4)=-D;
    A(n+4,n)=D;
end;
A(1,6)=E;
A(6,1)=C;
for n=1:3
    A(n,n+6)=((-1)^(n+1))*Y;
    A(n+1,n+6)=((-1)^n)*T;
    A(n+2,n+6)=((-1)^n)*T;
    A(n+3,n+6)=((-1)^n)*Y;
end;
for n=1:2
    A(n,n+7)=((-1)^n)*T;
    A(n+4,n+6)=((-1)^(n+1))*T;
end;
A(1,9)=T;
A(6,7)=T;
for n=1:2
    A(7,n+2)=-U;

```

```

A(8,n+1)=U;
A(8,n+4)=-U;
A(n+6,n+6)=((-1)^(n+1))*KS;
A(n+6,9)=((-1)^n)*KS;
end;
A(7,1)=U;
A(7,6)=U;
for n=1:3
    A(9,n+6)=1;
end;

% Матрица свободных членов
S=[W1*X(7)+P*(X(6)+X(2))+Q*X(1);
    W1*(-1)*X(8)+P*(X(1)+X(3))+Q*X(2);
    W1*X(9)+P*(X(2)+X(4))+Q*X(3);
    W1*(-1)*X(7)+P*(X(3)+X(5))+Q*X(4);
    W1*X(8)+P*(X(4)+X(6))+Q*X(5);
    W1*(-1)*X(9)+P*(X(5)+X(1))+Q*X(6);
    U*(X(1)-X(4)+X(6)-X(3))+(Ls/dt)*(X(7)-X(9))+Uab;
    U*(X(3)-X(6)+X(2)-X(5))+(Ls/dt)*(X(9)-X(8))+Ubc;
    0];

% Решение методом Гаусса-Жордана
Z=rref([A S]); % Приведение расширенной матрицы к треугольному виду
X=Z(1:9,10:10); % Выделение последнего столбца из матрицы
Is=[X(7),-X(8),X(9),-X(7),X(8),-X(9)];

% Матрица токов ротора
Ir(1)=-wn*Is(1)-Rb*X(6)+2*Rb*X(1)-Rb*X(2);
for n=1:4
    Ir(n+1)=-wn*Is(n+1)-Rb*X(n)+2*Rb*X(n+1)-Rb*X(n+2);
end;
Ir(6)=-wn*Is(6)-Rb*X(5)+2*Rb*X(6)-Rb*X(1);

% Электромагнитное усилие
F(1)=(X(2)-X(6))*Ir(1)/(2*tz);
for n=1:4

```

```

F(n+1)=(X(n+2)-X(n))*Ir(n+1)/(2*tz);
end;
F(6)=(X(1)-X(5))*Ir(6)/(2*tz);

% Скорость
v0=v0+(sum(F)/m)*dt;
end;
% Построение графиков
k=0:(K);
subplot(2,1,1);
plot(k*dt,v);title('Скорость');
xlabel('t, c');
ylabel('v, м/с');
grid on
subplot(2,1,2);
plot(k*dt,f);
title('Электромагнитное усилие');
xlabel('t, c');
ylabel('F, Н');
grid on
end

```

Результаты моделирования представлены в таблице 1, а также на рис.2.

Таблица 1 – Результаты расчетов

k = 1					k = 2				
	X	S	$i'_{n,k}$	$F_{n,k}$		X	S	$i'_{n,k}$	$F_{n,k}$
Φ_1	-2,33E-05	4,251e-17	55,597	0,692	Φ_1	-6,55E-05	-0,0025	150,53	2,53
Φ_2	0,00011	0,00722	-245,88	-1,970	Φ_2	0,00013	0,01861	-270,53	-3,64
Φ_3	0,00013	0,00722	-301,48	1,339	Φ_3	0,0002	0,02119	-421,06	1,43
Φ_4	2,32E-05	8,26e-18	-55,6	0,692	Φ_4	6,55E-05	0,00257	-150,53	2,54
Φ_5	-	-	245,88	-1,971	Φ_5	-0,00013	-	270,53	-3,64

	0,00011	0,00722					0,01861		
Φ_6	-	-	301,48	1,339	Φ_6	-0,00019	-	421,06	1,43
	0,00013	0,00722				0,02119			
I_A	-0,395	-182,2	$F_{\Sigma k}$	$1,11E-15$	I_A	-1,08	-299,36	$F_{\Sigma k}$	0,12
I_C	-1,781	281,4			I_C	-2,01	369,2		
I_B	2,176	0			I_B	3,09	0		

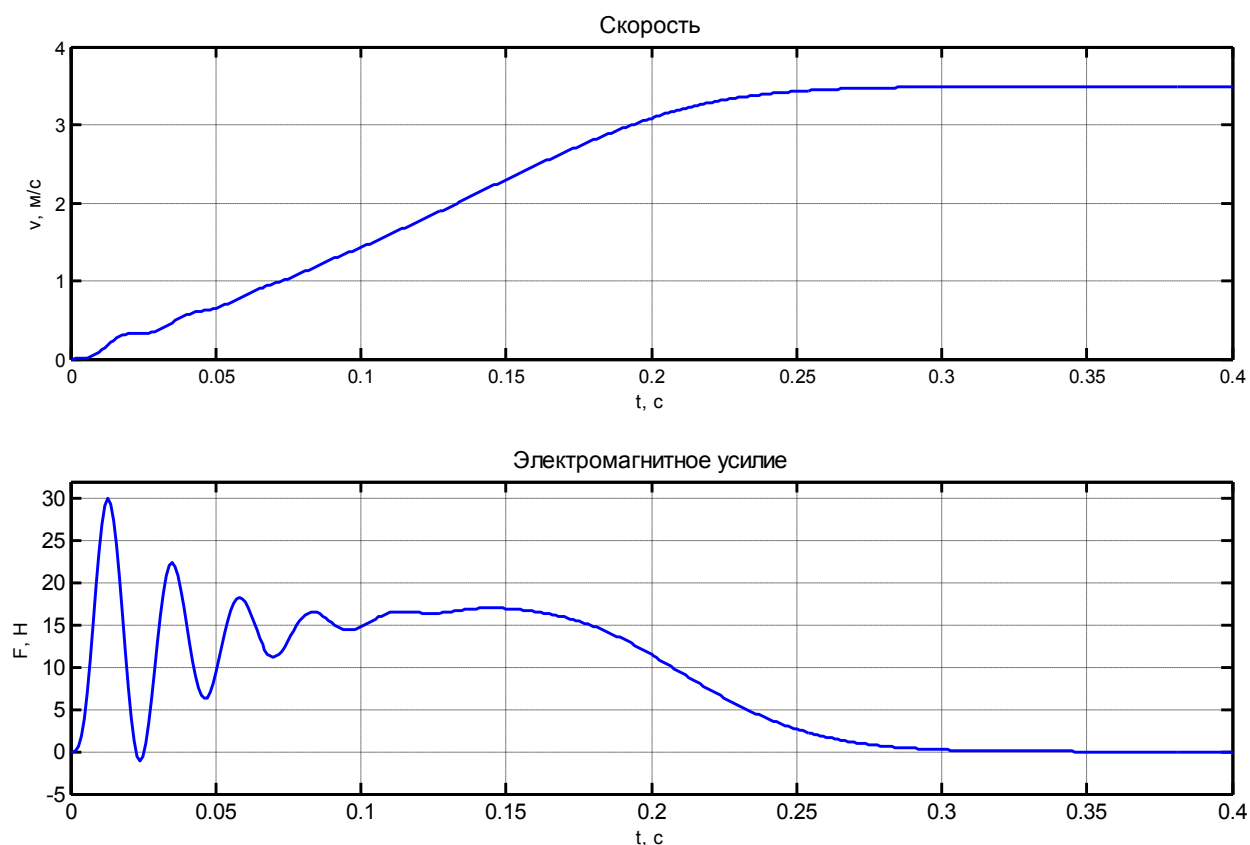


Рис.2. Зависимости электромагнитного усилия и скорости подвижного элемента от времени при пуске

Литература

1. Саранулов Ф.Н., Емельянов А.А., Иваницкий С.В., Резин М.Г. Исследование электромеханических переходных процессов линейного асинхронного короткозамкнутого двигателя // Электричество. – 1982. – №10. – С. 54–57.

2. Емельянов А.А., Богатов Е.А., Клишин А.В., Медведев А.В., Симонович В.Г. Математическая модель линейного асинхронного двигателя на основе магнитных схем замещения // Молодой ученый. – 2010. – №5. – С.14–22.

3. Емельянов А.А., Медведев А.В., Богатов Е.А., Кобзев А.В., Бочкарев Ю.П. Программирование линейного асинхронного двигателя в MATLAB // Молодой ученый. – 2013. – №3. – С. 129-143.

4. Ануфриев И.Е. и др. MATLAB 7 / Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н.. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

Емельянов А. А., Медведев А. В., Кобзев А.В.

ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Екатеринбург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЧИСЛОМ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ РАВНОМ ДВУМ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Математическая модель линейного асинхронного двигателя на основе магнитных схем замещения для исследования электромеханических переходных процессов приведена в статье [1].

Целью данной работы является изложение математической модели линейного асинхронного двигателя на основе электрических и магнитных схем замещения в доступной для понимания студентами форме. Данная работа является продолжением статьи [2], в которой опубликован без сокращения вывод математического аппарата. Для качественного восприятия системы в данной работе повторим основные моменты статьи [2] и покажем процесс перехода от выведенных формул к программированию в MATLAB.

Условное изображение линейного асинхронного двигателя приведено на рисунке 1 а. В активной зоне индуктора (статора) в началах обмоток А, В и С условно примем токи со знаком «+», тогда в соответствующих концах обмоток х, у и z — знак «-». Для учета отрицательных токов необходимо умножить соответствующие элементы матрицы А на (-1). В шунтирующих зонах под набегающим и сбегающим краями примем по четыре зубцовых деления. На рисунке 1 б приведена соответствующая магнитная схема замещения линейного асинхронного двигателя.