

УДК 62

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХМАССОВОЙ
УПРУГОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫМИ
КОРНЯМИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ
(БЕЗ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ)**



**INVESTIGATION OF TRANSIENT CHARACTERISTICS OF A TWO-MASS
ELASTIC ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH REAL ROOTS
OF THE CHARACTERISTIC EQUATION (WITHOUT CONSIDERATION
OF THE EFFECT OF THE ANCHOR CIRCUIT INDUCTANCE)**

Добробаба Юрий Петрович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
электроснабжения промышленных предприятий,
Кубанский государственный технологический университет

Чувиллин Никита Александрович

студент,
Кубанский государственный технологический университет
pchn257@mail.ru

Шефер Сергей Сергеевич

студент,
Кубанский государственный технологический университет

Аннотация. В данной статье определена передаточная функция, получен алгоритм определения трех варьируемых параметров и выполнено комплексное исследование переходных характеристик двухмассовой упругой электро-механической системы с действительными корнями характеристического уравнения (без учета влияния индуктивности якорной цепи).

Ключевые слова: двухмассовая упругая электромеханическая система, влияние индуктивности, переходные характеристики.

Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of department
of power supply industrial enterprises
Kuban state technological university

Chuvilin Nikita Aleksandrovich

Student,
Kuban state technological university
pchn257@mail.ru

Shefer Sergey Sergeevich

Student,
Kuban state technological university.

Annotation. In this article, the transfer function is defined, an algorithm for determining three variable parameters is obtained, and a comprehensive study of the transient characteristics of a two-mass elastic electromechanical system with real roots of the characteristic equation is carried out (without taking into account the influence of the armature circuit inductance).

Keywords: two-mass elastic electromechanical system, inductance effect, transient characteristics.

Математическая модель двухмассовой упругой электромеханической системы без учета влияния индуктивности якорной цепи описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} U = C_e \omega_1 + R_a I_a; \\ C_M I_a = M_y + J_1 p \omega_1; \\ M_y p = C_y \cdot (\omega_1 - \omega_2); \\ M_y = M_{co} + J_2 p \omega_2, \end{cases}$$

где U – напряжение, подаваемое на якорную цепь двигателя; C_e – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС двигателя; ω_1 и ω_2 – угловые скорости исполнительных органов двигателя и механизма; R_a – сопротивление якорной цепи двигателя; I_a – ток якорной цепи двигателя; C_M – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя; M_y – момент в валопроводе; J_1 и J_2 , – моменты инерции исполнительных органов двигателя и механизма; M_{co} – момент сопротивления; C_y – коэффициент упругости валопровода.

Определим передаточную функцию двухмассовой упругой электромеханической системы без учета влияния индуктивности якорной цепи по каналу управления:

$$\begin{cases}
 \frac{U}{C_e} = \omega_1 + \frac{R_n}{C_e} \cdot I_n; \\
 C_M I_n = M_{co} + J_1 p \omega_1 + J_2 p \omega_2; \\
 \omega_1 = \left(\frac{J_2}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot \omega_2 + \frac{p}{C_y} \cdot M_{co};
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 \frac{U}{C_e} = \left(\frac{J_2}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot \omega_2 + \frac{p}{C_y} \cdot M_{co} + \frac{R_n}{C_e} \cdot I_n; \\
 C_M I_n = \left[\frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot p^3 + (J_1 + J_2) \cdot p \right] \cdot \omega_2 + \left(\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot M_{co};
 \end{cases}$$

$$I_n = \frac{1}{C_M} \cdot \left[\frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot p^3 + (J_1 + J_2) \cdot p \right] \cdot \omega_2 + \frac{1}{C_M} \cdot \left(\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot M_{co};$$

$$\begin{aligned}
 \frac{U}{C_e} = & \left(\frac{J_2}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot \omega_2 + \frac{p}{C_y} \cdot M_{co} + \frac{R_n}{C_e C_M} \cdot \left[\frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot p^3 + (J_1 + J_2) \cdot p \right] \cdot \omega_2 + \\
 & + \frac{1}{C_M} \cdot \left(\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + 1 \right) \cdot M_{co};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \left[\frac{R_n J_1 J_2}{C_e C_M} \cdot p^3 + \frac{J_2}{C_y} \cdot p^2 + \frac{R_n (J_1 + J_2)}{C_e C_M} \cdot p + 1 \right] \cdot \omega_2 = & \frac{U}{C_e} - \\
 - \frac{R_n}{C_e C_M} \cdot \left(\frac{J_1}{C_y} \cdot p^2 + \frac{C_e C_M}{R_n C_y} \cdot p + 1 \right) \cdot M_{co};
 \end{aligned}$$

$$\frac{\omega_2(p)}{U(p)} = \frac{1}{C_e} \cdot \frac{1}{\frac{R_n J_1 J_2}{C_e C_M C_y} \cdot p^3 + \frac{J_2}{C_y} \cdot p^2 + \frac{R_n (J_1 + J_2)}{C_e C_M} \cdot p + 1}.$$

Передаточная функция третьего порядка с тремя кратными корнями характеристического уравнения имеет вид:

$$W_{30}(p) = \frac{1}{(Tp + 1)^3} = \frac{1}{T^3 p^3 + 3T^2 p^2 + 3Tp + 1},$$

где T – постоянная времени полинома знаменателя передаточной функции третьего порядка, с.

Приравняем коэффициенты характеристического уравнения при равных степенях оператора дифференцирования p в исследуемой системе и в системе третьего порядка с тремя кратными корнями:

$$\begin{cases}
 \frac{R_n J_1 J_2}{C_e C_M C_y} = T^3; \\
 \frac{J_2}{C_y} = 3T^2; \\
 \frac{R_n (J_1 + J_2)}{C_e C_M} = 3T.
 \end{cases}$$

Из данной системы трех уравнений определяем три варьируемых параметра двухмассовой упругой электромеханической системы:

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \frac{1}{8} J_2; \\
 C_y &= \frac{64}{27} \cdot \frac{C_e^2 C_M^2}{R_n^2 J_2};
 \end{aligned}$$

$$T = \frac{3}{8} \cdot \frac{R_{\pi} J_2}{C_{\sigma} C_M}$$

При этом переходная характеристика системы имеет вид:

$$h(t) = -e^{-\frac{t}{T}} - \frac{t}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} - \frac{t^2}{2T^2} \cdot e^{-\frac{t}{T}} + 1.$$

Если $C_{\sigma} = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$; $C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}$; $R_{\pi} = 5 \text{ Ом}$; $J_2 = 0,08 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, то

$$\begin{aligned} J_1 &= 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\ C_y &= \frac{625}{216} = 2 \frac{193 \text{ Н} \cdot \text{м}}{216 \text{ рад}}; \\ T &= 0,096 \text{ с}. \end{aligned}$$

При $J_1 = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и $C_y = 2 \frac{193 \text{ Н} \cdot \text{м}}{216 \text{ рад}}$

$$h_1(t) = -e^{-\frac{t}{0,096}} - \frac{t}{0,096} \cdot e^{-\frac{t}{0,096}} - \frac{t^2}{2 \cdot 0,096^2} \cdot e^{-\frac{t}{0,096}} + 1.$$

Передаточная функция третьего порядка с двумя кратными корнями характеристического уравнения имеет вид:

$$\begin{aligned} W_{30}(p) &= \frac{1}{(T_1 p + 1)^2 \cdot (T_2 p + 1)} = \\ &= \frac{1}{T_1^2 T_2 p^3 + (T_1^2 + 2T_1 T_2) \cdot p^2 + (2T_1 + T_2) \cdot p + 1}, \end{aligned}$$

где T_1 и T_2 – постоянные времени знаменателя передаточной функции третьего порядка, с.

Приравняем коэффициенты характеристических уравнений при равных степенях оператора дифференцирования p в исследуемой системе и в системе третьего порядка с двумя кратными:

$$\begin{cases} \frac{R_{\pi} J_1 J_2}{C_{\sigma} C_M C_y} = T_1^2 T_2; \\ \frac{J_2}{C_y} = T_1^2 + 2T_1 T_2; \\ \frac{R_{\pi} (J_1 + J_2)}{C_{\sigma} C_M} = 2T_1 + T_2. \end{cases}$$

Из данной системы трех уравнений получим алгоритм определения трех варьируемых параметров двухмассовой упругой электромеханической системы T_1, T_2 и C_y при заданном параметре системы J_1 :

$$\begin{aligned} \begin{cases} \frac{R_{\pi} J_1 J_2}{C_{\sigma} C_M C_y} = \frac{R_{\pi} (J_1 + J_2)}{C_{\sigma} C_M} \cdot T_1^2 - 2T_1^3; \\ \frac{J_2}{C_y} = 2 \cdot \frac{R_{\pi} (J_1 + J_2)}{C_{\sigma} C_M} \cdot T_1 - 3T_1^2. \end{cases} \\ \frac{R_{\pi} J_1}{C_{\sigma} C_M} \cdot \left[2 \cdot \frac{R_{\pi} (J_1 + J_2)}{C_{\sigma} C_M} - 3T_1 \right] = \frac{R_{\pi} (J_1 + J_2)}{C_{\sigma} C_M} \cdot T_1 - 2T_1^2; \\ T_1^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\pi} (4J_1 + J_2)}{C_{\sigma} C_M} \cdot T_1 + \frac{R_{\pi} (J_1 + J_2)}{C_{\sigma} C_M} \cdot \frac{R_{\pi} J_1}{C_{\sigma} C_M} = 0. \end{aligned}$$

$$T_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{R_a(4J_1 + J_2)}{C_s C_M} \pm \frac{1}{4} \cdot \frac{R_a}{C_s C_M} \cdot \sqrt{J_2^2 - 8J_1 J_2}$$

При этом $J_1 \leq \frac{1}{8} J_2$.

Если $J_1 = \frac{1}{8} J_2$, то $T_1 = \frac{3}{8} \cdot \frac{R_a J_2}{C_s C_M}$, $T_2 = \frac{3}{8} \cdot \frac{R_a J_2}{C_s C_M}$, $C_y = \frac{64}{27} \cdot \frac{C_s^2 C_M^2}{R_a^2 J_2}$.

Если $J_1 = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, то $C_y = \frac{625}{216} = 2 \frac{193}{216} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$; $T_1 = 0,096 \text{ с}$; $T_2 = 0,096 \text{ с}$.

Если $J_1 < \frac{1}{8} J_2$, то возможны два варианта решения.

Если $J_1 = 0,0075 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, то

Вариант 1: $C_y = 3 \frac{1}{3} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$; $T_1 = 0,12 \text{ с}$; $T_2 = 0,04 \text{ с}$.

Вариант 2: $C_y = 3,644314869 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$; $T_1 = 0,056 \text{ с}$; $T_2 = 0,168 \text{ с}$.

При этом переходная характеристика системы имеет вид:

$$h(t) = -\frac{T_1 \cdot (T_1 - 2T_2)}{(T_1 - T_2)^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{1}{T_1 - T_2} \cdot t \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{T_2^2}{(T_1 - T_2)^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} + 1.$$

Если $J_1 = 0,0075 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и $C_y = 3,333333333 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$, то

$$h_2(t) = -0,75 \cdot e^{-\frac{t}{0,12}} - \frac{t}{0,08} \cdot e^{-\frac{t}{0,04}} - 0,25 \cdot e^{-\frac{t}{0,04}} + 1.$$

Если $J_1 = 0,0075 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и $C_y = 3,644314869 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$, то

$$h_3(t) = 1,25 \cdot e^{-\frac{t}{0,056}} + \frac{t}{0,112} \cdot e^{-\frac{t}{0,168}} - 2,25 \cdot e^{-\frac{t}{0,168}} + 1.$$

В таблице 1 приведены результаты первого численного эксперимента.

Таблица 1

J_1	T_1	T_2	C_y
0,0100	0,096000000	0,096000000	2,893518519
0,0095	0,108710835	0,068978330	2,983357193
	0,080089165	0,126221670	3,003876879
0,0090	0,113038577	0,058722846	3,070591517
	0,072561423	0,139677154	3,132892687
0,0085	0,115987093	0,051225813	3,157553450
	0,066412907	0,150374187	3,280806633
0,0080	0,118221670	0,045156660	3,244994508
	0,060978330	0,159643340	3,450071495
0,0075	0,120000000	0,040000000	3,333333333
	0,056000000	0,168000000	3,644314869
0,0070	0,121454244	0,035491513	3,422851902
	0,051345756	0,175708487	3,868442545
0,0065	0,122662911	0,031474179	3,513762394
	0,046937089	0,182925821	4,129010570
0,0060	0,123677154	0,027845692	3,606236827
	0,042722846	0,189754308	4,434852910
0,0055	0,124532505	0,024534990	3,700422743
	0,038667495	0,196265010	4,798082373
0,0050	0,125254834	0,021490332	3,796451554
	0,034745166	0,202509668	5,235708106

На рисунке 1 приведены зависимости $C_y = \varphi(J_1)$. Под номером 1 представлена зависимость для первого варианта, а под номером 2 представлена зависимость для второго варианта.

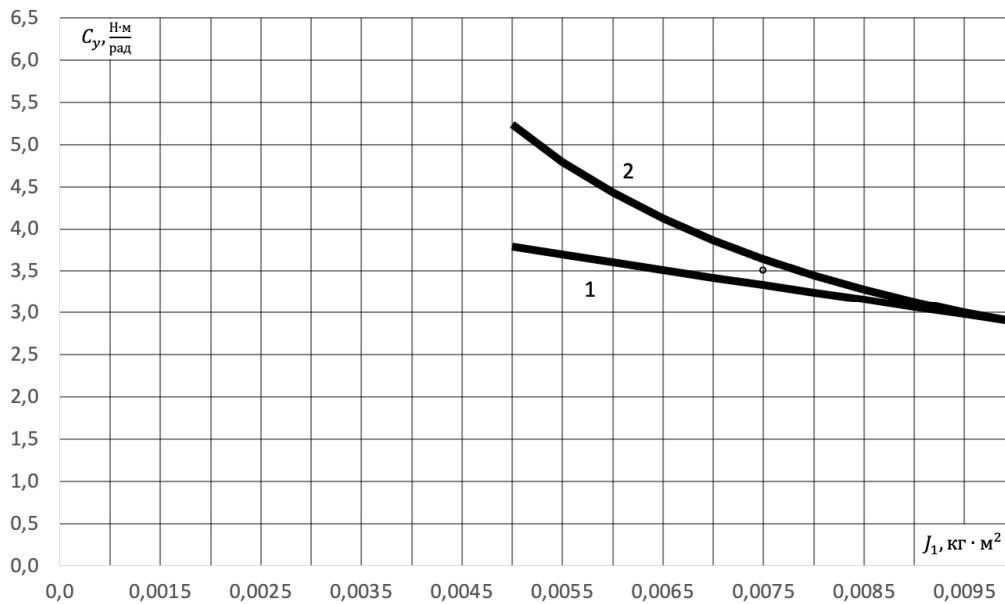


Рисунок 1

На рисунке 2 показаны зависимости $T_1 = \varphi_1(J_1)$ и $T_2 = \varphi_2(J_1)$.

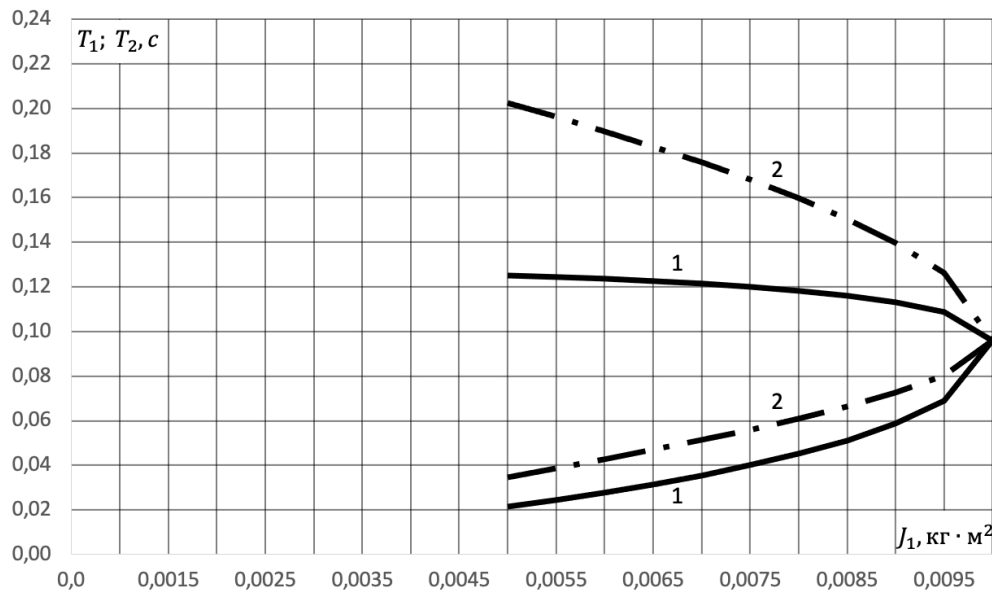


Рисунок 2

Проведем исследование переходных характеристик двухмассовой упругой электромеханической системы с действительными корнями характеристического уравнения (без учета влияния индуктивности якорной цепи) косвенным методом.

Принимаем $T_2 = \alpha T_1$.

$$\begin{cases} \frac{R_{\pi} J_2}{C_{\pi} C_M C_y} = \alpha T_1^3; \\ \frac{J_2}{C_y} = (1 + 2\alpha) \cdot T_1^2; \\ \frac{R_{\pi} (J_1 + J_2)}{C_{\pi} C_M} = (2 + \alpha) \cdot T_1. \end{cases}$$

Из системы следует, что

$$\frac{R_n J_1}{C_s C_M} = \frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \cdot T_1;$$

$$T_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + 2\alpha}{(1 + \alpha)^2} \cdot \frac{R_n J_2}{C_s C_M};$$

$$\frac{J_2}{C_y} = (1 + 2\alpha) \cdot \frac{(1 + 2\alpha)^2}{4 \cdot (1 + \alpha)^4} \cdot \frac{R_n^2 J_2^2}{C_s^2 C_M^2};$$

$$C_y = 4 \cdot \frac{(1 + \alpha)^4}{(1 + 2\alpha)^3} \cdot \frac{C_s^2 C_M^2}{R_n^2 J_2^2};$$

$$J_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha}{(1 + \alpha)^2} \cdot J_2.$$

В таблице 2 приведены результаты второго численного эксперимента.

Таблица 2

α	T_1	T_2	J_1	C_y
0,1	0,126942149	0,012694215	0,003305785	4,137109827
0,2	0,124444444	0,024888889	0,005555556	3,689868805
0,3	0,121183432	0,036355030	0,007100592	3,404736519
0,4	0,117551020	0,047020408	0,008163265	3,216360168
0,5	0,113777778	0,056888889	0,008888889	3,089904785
0,6	0,110000000	0,066000000	0,009375000	3,005259204
0,7	0,106297578	0,074408304	0,009688581	2,950067873
0,8	0,102716049	0,082172840	0,009876543	2,916352555
0,9	0,099279778	0,089351801	0,009972299	2,898747302
1	0,096000000	0,096000000	0,010000000	2,893518519
1,1	0,092879819	0,102167800	0,009977324	2,897992730
1,2	0,089917355	0,107900826	0,009917355	2,910207930
1,3	0,087107750	0,113240076	0,009829868	2,928693272
1,4	0,084444444	0,118222222	0,009722222	2,952325412
1,5	0,081920000	0,122880000	0,009600000	2,980232239
1,6	0,079526627	0,127242604	0,009467456	3,011726764
1,7	0,077256516	0,131336077	0,009327846	3,046260751
1,8	0,075102041	0,135183673	0,009183673	3,083391551
1,9	0,073055886	0,138806183	0,009036861	3,122757982
2	0,071111111	0,142222222	0,008888889	3,164062500

На рисунке 3 приведены зависимости постоянных времени T_1 и T_2 от коэффициента α .

На рисунке 4 приведена зависимость момента инерции исполнительного органа двигателя J_1 от коэффициента α .

На рисунке 5 приведена зависимость упругости валопровода C_y от коэффициента α .

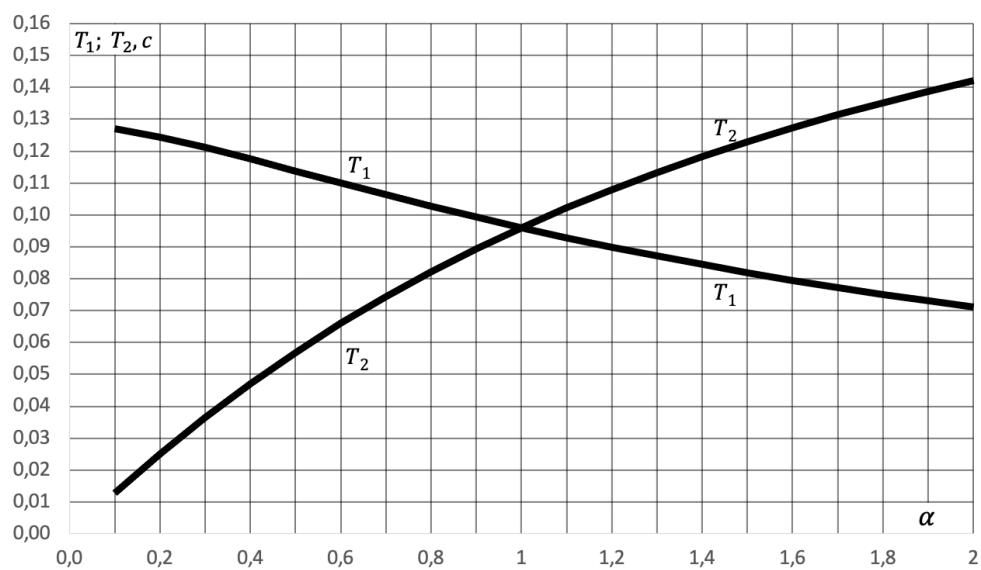


Рисунок 3

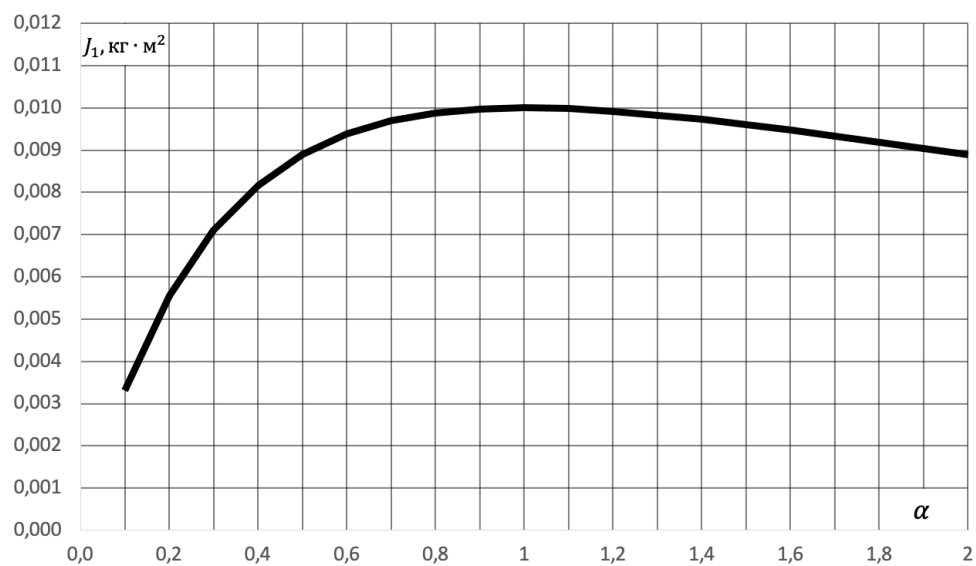


Рисунок 4

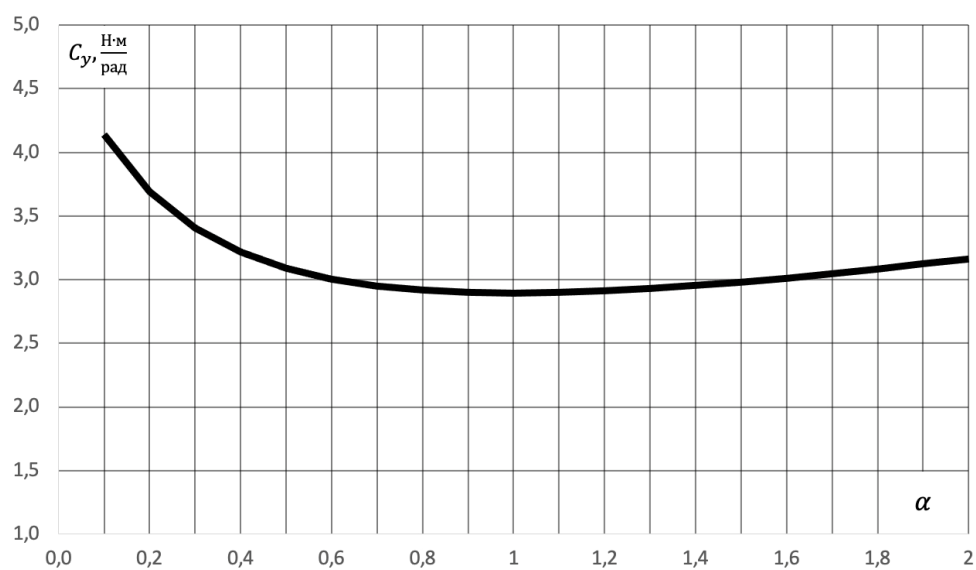


Рисунок 5

Передаточная функция третьего порядка с тремя действительными разными корнями характеристического уравнения имеет вид:

$$W_{30}(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1) \cdot (T_3 p + 1)} = \frac{1}{T_1 T_2 T_3 p^3 + [T_1 \cdot (T_2 + T_3) + T_2 T_3] \cdot p^2 + [T_1 + (T_2 + T_3)] \cdot p + 1},$$

где T_1, T_2 и T_3 – постоянные времени знаменателя передаточной функции третьего порядка, с.

Приравняем коэффициенты характеристических уравнений при равных степенях оператора дифференцирования p в исследуемой системе и в системе третьего порядка с тремя действительными разными корнями:

$$\begin{cases} \frac{R_n J_2}{C_e C_M C_y} = T_1 \cdot T_2 T_3; \\ \frac{J_2}{C_y} = T_1 \cdot (T_2 + T_3) + T_2 T_3; \\ \frac{R_n (J_1 + J_2)}{C_e C_M} = T_1 + (T_2 + T_3). \end{cases}$$

Из данной системы из трех уравнений получим алгоритм определения трех варьируемых параметров двухмассовой упругой электромеханической системы T_1, T_2 и T_3 при заданных параметрах J_1 и C_y .

$$\begin{aligned} (T_2 + T_3) &= \frac{R_n (J_1 + J_2)}{C_e C_M} - T_1; \\ \frac{J_2}{C_y} &= \frac{R_n (J_1 + J_2)}{C_e C_M} \cdot T_1 - T_1^2 + T_2 T_3; \\ T_2 T_3 &= T_1^2 - \frac{R_n (J_1 + J_2)}{C_e C_M} \cdot T_1 + \frac{J_2}{C_y}; \\ \frac{R_n J_2}{C_e C_M C_y} &= T_1^3 - \frac{R_n (J_1 + J_2)}{C_e C_M} \cdot T_1^2 + \frac{J_2}{C_y} \cdot T_1; \\ T_1^3 - \frac{R_n (J_1 + J_2)}{C_e C_M} \cdot T_1^2 + \frac{J_2}{C_y} \cdot T_1 - \frac{R_n J_2}{C_e C_M C_y} &= 0. \end{aligned}$$

При этом переходная характеристика системы имеет вид:

$$h(t) = -\frac{T_1^2}{(T_1 - T_2) \cdot (T_1 - T_3)} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2^2}{(T_1 - T_2) \cdot (T_2 - T_3)} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{T_3^2}{(T_1 - T_3) \cdot (T_2 - T_3)} \cdot e^{-\frac{t}{T_3}} + 1.$$

Если $C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$; $C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}$; $R_n = 5 \text{ Ом}$; $J_1 = 0,0075 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;

$$J_2 = 0,08 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; C_y = 3,5 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}, \text{ то}$$

$$T_1^3 - 0,28 \cdot T_1^2 + 0,022857142 \cdot T_1 - 5,485714286 \cdot 10^{-4} = 0.$$

Постоянные времени системы соответственно равны:

$$T_1 = 0,156061201 \text{ с}; T_2 = 0,079999975 \text{ с}; T_3 = 0,043938823 \text{ с}.$$

При этом

$$h_4(t) = -2,855842 \cdot e^{-\frac{t}{0,156061201}} + 2,333333 \cdot e^{-\frac{t}{0,079999975}} - 0,477491 \cdot e^{-\frac{t}{0,043938823}} + 1.$$

На рисунке 1 показана точка с координатами $J_1 = 0,0075 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и

$$C_y = 3,5 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад.}}$$

Принимаем $T_2 = \alpha T_1$ и $T_3 = \beta T_1$.

$$\begin{cases} \frac{R_H J_2}{C_\sigma C_M C_y} = \alpha \beta T_1^3; \\ \frac{J_2}{C_y} = (\alpha + \beta + \alpha \beta) \cdot T_1^2; \\ \frac{R_H (J_1 + J_2)}{C_\sigma C_M} = (1 + \alpha + \beta) \cdot T_1. \end{cases}$$

Из системы следует:

$$\begin{aligned} \frac{R_H J_1}{C_\sigma C_M} \cdot (\alpha + \beta + \alpha \beta) &= \alpha \beta T_1^3; \\ \frac{R_H J_1}{C_\sigma C_M} &= \frac{\alpha \beta}{\alpha + \beta + \alpha \beta} \cdot T_1^3; \\ \frac{R_H J_2}{C_\sigma C_M} &= (1 + \alpha + \beta) \cdot T_1^2 - \frac{\alpha \beta}{\alpha + \beta + \alpha \beta} \cdot T_1^3; \\ \frac{R_H J_2}{C_\sigma C_M} &= \frac{(1 + \alpha + \beta) \cdot (\alpha + \beta + \alpha \beta) - \alpha \beta}{\alpha + \beta + \alpha \beta} \cdot T_1^2; \\ \frac{R_H J_2}{C_\sigma C_M} &= \frac{(\alpha + \beta) \cdot (1 + \alpha + \beta + \alpha \beta)}{\alpha + \beta + \alpha \beta} \cdot T_1^2; \\ T_1 &= \frac{\alpha + \beta + \alpha \beta}{(\alpha + \beta) \cdot (1 + \alpha + \beta + \alpha \beta)} \cdot \frac{R_H J_2}{C_\sigma C_M}; \\ J_1 &= \frac{\alpha \beta}{(\alpha + \beta) \cdot (1 + \alpha + \beta + \alpha \beta)} \cdot J_2; \\ C_y &= \frac{(\alpha + \beta)^2 \cdot (1 + \alpha + \beta + \alpha \beta)^2}{(\alpha + \beta + \alpha \beta)^3} \cdot \frac{C_\sigma^2 C_M^2}{R_H^2 J_2} \end{aligned}$$

В таблице 3 приведены результаты третьего численного эксперимента при $\alpha = 0,8$.

Таблица 3

β	T_1	T_2	T_3	J_1	C_y
1	2	3	4	5	6
0,1	0,140785634	0,112628507	0,014078563	0,003591470	4,118577368
0,2	0,137481481	0,109985185	0,027496296	0,005925926	3,648745656
0,3	0,133271173	0,106616939	0,039981352	0,007459207	3,361342343
0,4	0,128677249	0,102941799	0,051470899	0,008465608	3,178651139
0,5	0,123988604	0,099190883	0,061994302	0,009116809	3,061100055
0,6	0,119365079	0,095492063	0,071619048	0,009523810	2,986603402
0,7	0,114893246	0,091914597	0,080425272	0,009760349	2,941939696
0,8	0,110617284	0,088493827	0,088493827	0,009876543	2,918743879
0,9	0,106556588	0,085245270	0,095900929	0,009907121	2,911481355
1	0,102716049	0,082172840	0,102716049	0,009876543	2,916352555
1,1	0,099092175	0,079273740	0,109001392	0,009802283	2,930666974
1,2	0,095676768	0,076541414	0,114812121	0,009696970	2,952468592

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6
1,3	0,092459167	0,073967334	0,120196917	0,009569818	2,980302752
1,4	0,089427609	0,071542088	0,125198653	0,009427609	3,013066109
1,5	0,086570048	0,069256039	0,129855072	0,009275362	3,049907184
1,6	0,083874644	0,067099715	0,134199430	0,009116809	3,090158743
1,7	0,081330041	0,065064033	0,138261070	0,008954733	3,133290762
1,8	0,078925519	0,063140415	0,142065934	0,008791209	3,178877042
1,9	0,076651057	0,061320846	0,145637009	0,008627785	3,226571087
2	0,074497354	0,059597884	0,148994709	0,008465608	3,276088379

На рисунке 6 представлены зависимости постоянных времени T_1 ; T_2 и T_3 от коэффициента β при $\alpha = 0,8$.

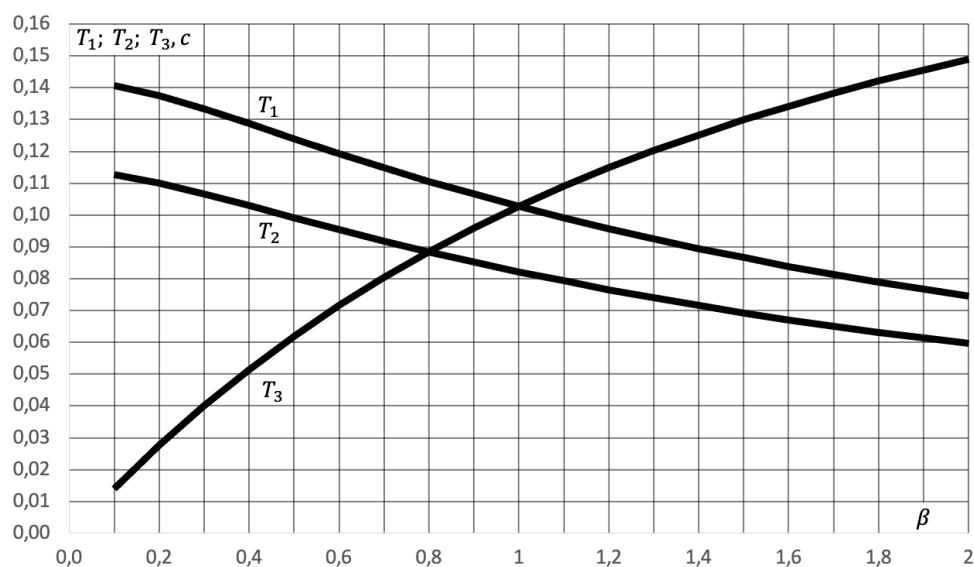


Рисунок 6

На рисунке 7 приведена зависимость момента инерции исполнительного органа двигателя J_1 от коэффициента β при $\alpha = 0,8$.

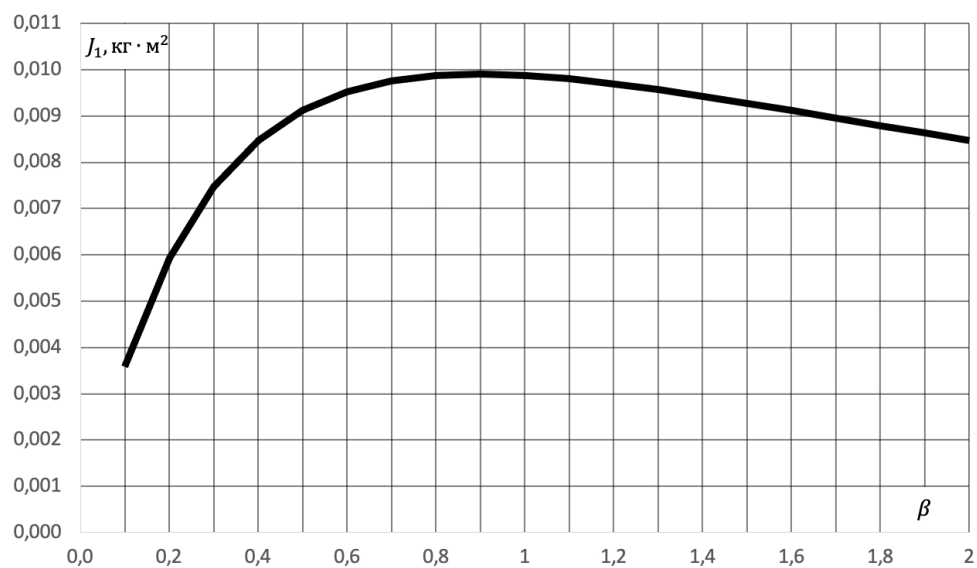


Рисунок 7

На рисунке 8 приведена зависимость упругости валопровода C_y от коэффициента β при $\alpha = 0,8$.

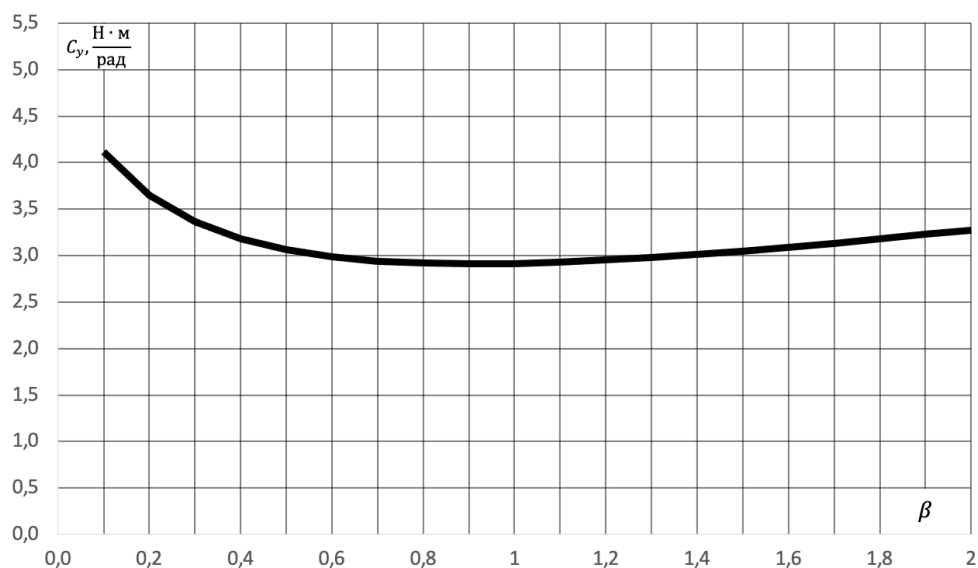


Рисунок 8

В таблице 4 приведены результаты четвертого численного эксперимента.

Таблица 4

ϵ	h_1	h_2	h_3	h_4
0	0	0	0	0
0,05	0,09657965	0,02191793	0,02384618	0,02295393
0,1	0,27954882	0,11028233	0,11858806	0,11477161
0,15	0,46284909	0,24204547	0,25644411	0,24989918
0,2	0,61605743	0,3844698	0,40117914	0,39369275
0,25	0,73339742	0,51702381	0,53203434	0,52543566
0,3	0,81874193	0,63047924	0,64124688	0,63664243
0,35	0,87873064	0,72262733	0,72828818	0,72600061
0,4	0,91988533	0,79486319	0,79577072	0,79558127
0,45	0,94761134	0,85007112	0,84721753	0,84864384
0,5	0,96602925	0,89147209	0,88603734	0,8885383
0,55	0,97812713	0,92206636	0,91514507	0,91823717
0,6	0,98600101	0,94441186	0,93688661	0,94019213
0,65	0,99108665	0,96057786	0,95308814	0,95634163
0,7	0,99435025	0,97218115	0,96514428	0,96817819
0,75	0,99643302	0,98045415	0,97410806	0,97683112
0,8	0,99775584	0,98631919	0,9807693	0,98314473
0,85	0,99859249	0,99045669	0,98571795	0,98774511
0,9	0,99911969	0,99336299	0,98939367	0,99109376
0,95	0,99945081	0,99539673	0,9921236	0,99352946
1	0,99965817	0,9968151	0,99415098	0,99530015

На рисунке 9 представлены четыре варианта переходных характеристик двух-массовой упругой электромеханической системы с действительными корнями характеристического уравнения (без учета влияния индуктивности якорной цепи).

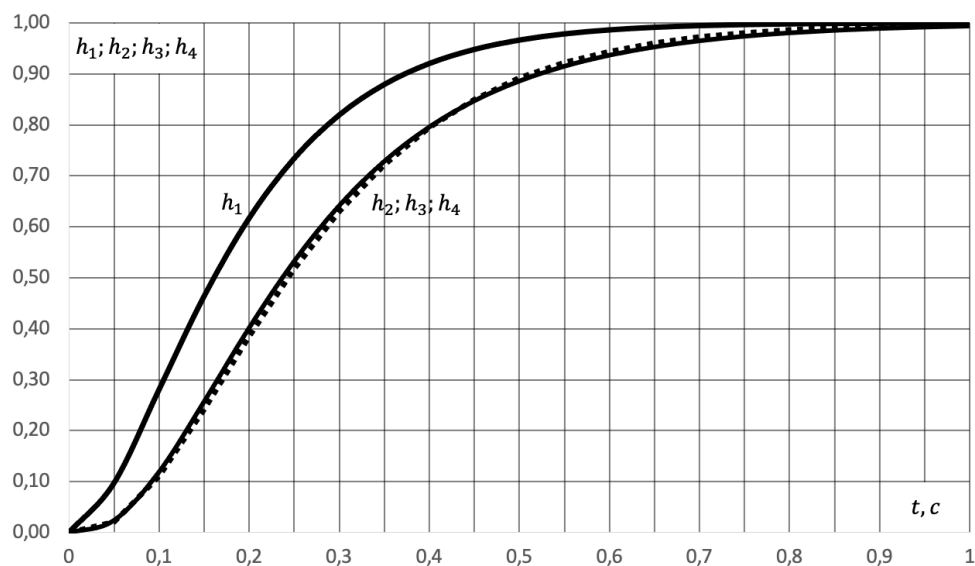


Рисунок 9

Таким образом, выполнено комплексное исследование переходных характеристик двухмассовой упругой электромеханической системы с действительными корнями характеристического уравнения (без учета влияния индуктивности якорной цепи).