

Приложение А
Значения обобщенных параметров МП

Таблица А.1 – Значения обобщенных параметров МП некоторых машин и механизмов

Машины и механизмы	Собственная частота $\Omega_{1,2} \text{ c}^{-1}$	Распределение масс γ
Прокатные станы:		
Главный привод реверсивного обжимного стана горячей прокатки	80...130	1,1...1,2
Нажимное устройство	50...90	1,7...2,0
Моталка стана холодной прокатки	50...100	1,3...1,8
Главный привод непрерывного заготовочного стана	60...80	1,1...1,5
Подъемные машины лифтов	50...70	2,0...2,5
Шахтные подъемные машины	1...10	1,5...3,5
Крановые машинные агрегаты:		
Подъем	10...25	2,0...3,0
Передвижение	16...50	5,0...10,0
Поворот	15...25	7,0...25
Привод станков:		
Токарные		1,1...1,2
Фрезерные	150...300	2,0...4,0
Карусельные		1,2...1,7
Экскаваторы:		
Механизм подъема, тяги	3...10	1,5...2,5
Механизм поворота	3,0...80	2,5...120
Трамваи и троллейбусы	15...60	3,0...5,0

Приложение Б Лабораторный практикум

Лабораторная работа 1

Тема: Исследование динамических свойств механической передачи с упругими свойствами.

Цель работы: выполнить исследование механической части электропривода, выявить закономерности управления и оценить полученные результаты.

Теоретические сведения

При решении задач ограничения динамических нагрузок используется двухмассовая расчетная схема, которая с достаточной степенью точности отражает реальные переходные процессы в приводах и позволяет довольно полно выявить основные закономерности электромеханического взаимодействия для основной гармоника.

Механическая часть ЭМС привода представляется двухмассовой расчетной схемой привода (рис. Б.1).

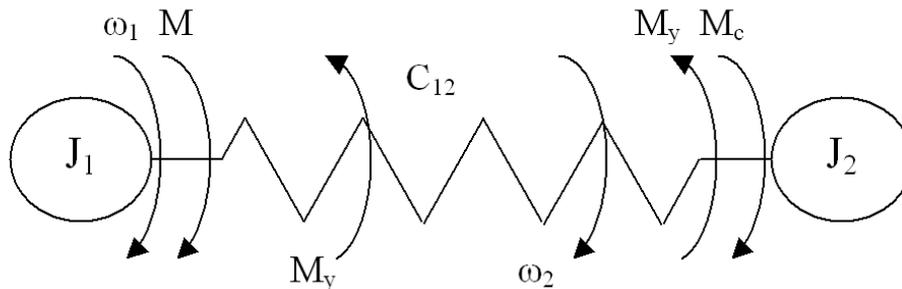


Рисунок Б.1 – Двухмассовая расчетная схема

Уравнения динамики механической части ЭМС имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} M - M_y = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \\ M_y - M_c = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}, \end{array} \right. \quad (Б.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_y = C_{12} \int (\omega_1 - \omega_2) dt, \end{array} \right. \quad (Б.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_y = C_{12} \int (\omega_1 - \omega_2) dt, \end{array} \right. \quad (Б.3)$$

где M_y – момент в упругом звене;

M_c – момент статического сопротивления, приведенный к валу двигателя;

M – момент на валу двигателя;
 J_1 – момент инерции якоря двигателя;
 J_2 – момент инерции механизма и элементов передачи, приведенный к валу двигателя;
 C_{12} – коэффициент жесткости двухмассовой системы;
 ω_1, ω_2 – угловая скорость двигателя и валков соответственно.

Представленная математическая модель позволяет в дальнейшем исследовать динамические свойства механической передачи с упругими свойствами с применением математического пакета Matlab. Для этого предварительно необходимо составить структурную схему на основании двухмассовой расчетной схемы, как показано на рисунке Б.2, то есть с учетом уравнений (Б.1), (Б.2), (Б.3), записанных на основании преобразования Лапласа, и типовых динамических звеньев получаем структурную схему.

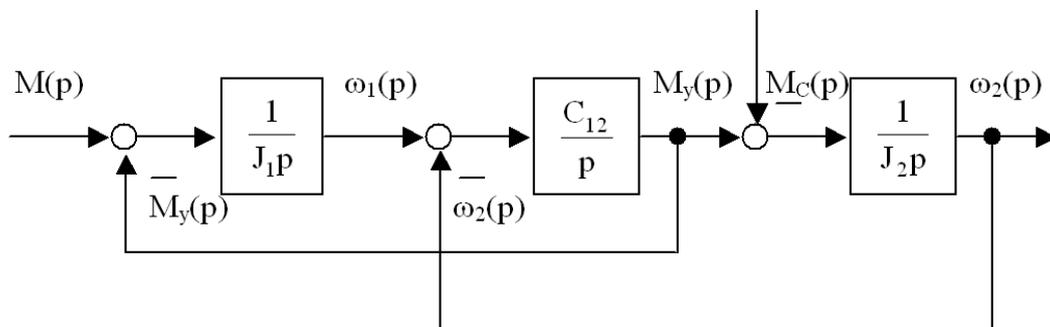


Рисунок Б.2 – Структурная схема двухмассовой расчетной схемы механической передачи без учета внутреннего демпфирования

Согласно данной структурной схеме выводятся передаточные функции по управляющему $W_{упр}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)}$ и возмущающему $W_{возм}(p) = \frac{M_y(p)}{M_c(p)}$ воздействиям по правилам преобразования структурных схем с параллельным, последовательным и встречно-параллельным соединением звеньев.

Полученные передаточные функции подвергаются обратному преобразованию Лапласа в пакете MathCAD функцией invlaplace с целью получения кривых переходных процессов (рис. Б.3).

$$J_1 := 5350 \quad J_2 := 2650 \quad \gamma := 1.5 \quad J := J_1 \gamma \quad \Omega_{12} := 62.8$$

$$W(p) := \frac{1}{J \cdot p \cdot \left[\left(\frac{1}{\Omega_{12}^2} \right) \cdot p^2 + 1 \right]}$$

$$H(p) := \frac{W(p)}{p}$$

$$H(p) \begin{cases} \text{invlaplace, p} \\ \text{simplify} \\ \text{float, 3} \end{cases} \rightarrow 1.25 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1.98 \cdot 10^{-6} \cdot \sin(62.8 \cdot t) \quad h(t) := 1.25 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1.98 \cdot 10^{-6} \cdot \sin(62.8 \cdot t)$$

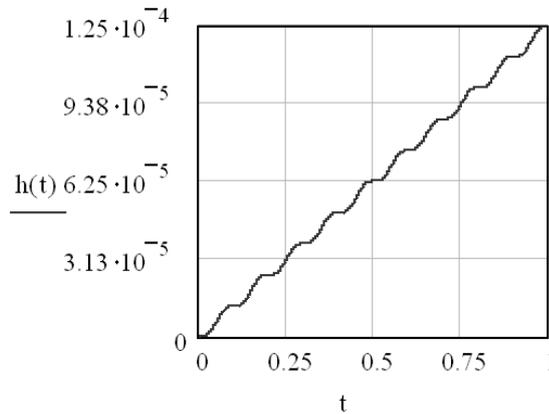


Рисунок Б.3 – Кривая переходного процесса

По структурной схеме составляется модель в среде Matlab (рис. Б.4) с учетом численных значений параметров и проводится исследование переходных процессов (для скорости механизма и двигателя, момента упругого – рис. Б.5) с оценкой показателей качества (степень затухания η , колебательность μ , время регулирования t_p , перерегулирование σ), которую можно производить визуально по графикам или на основании корней характеристического уравнения – знаменателя передаточных функций.

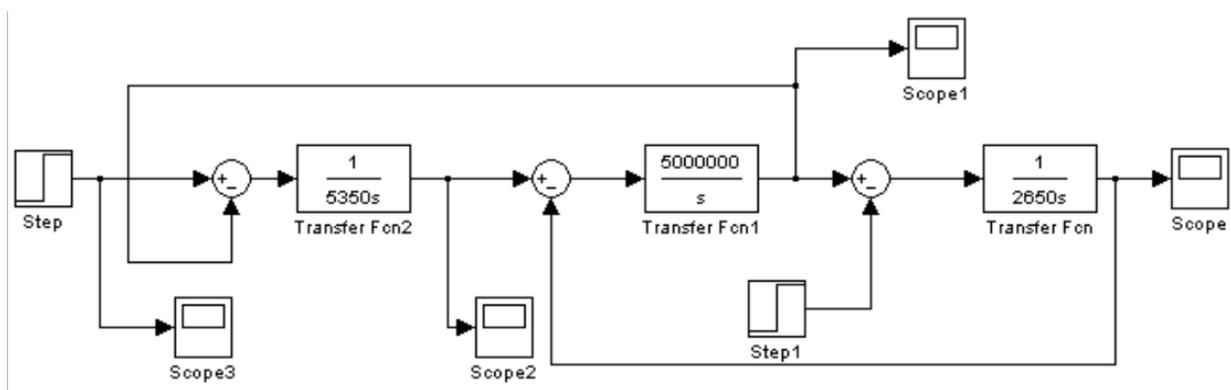
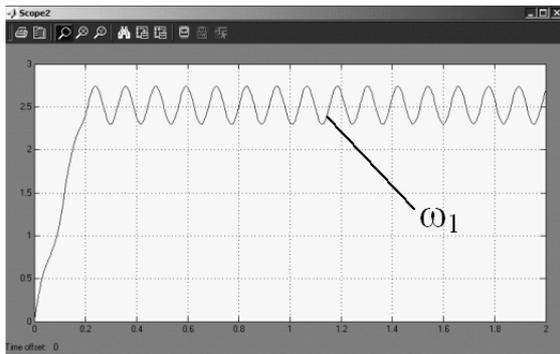
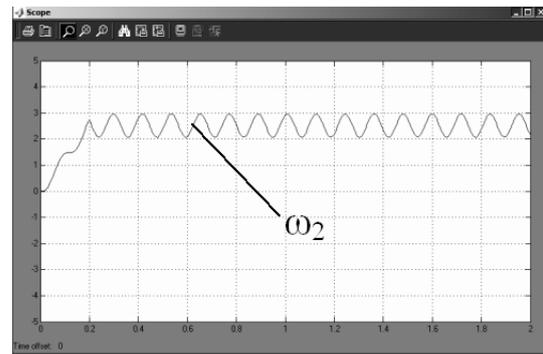


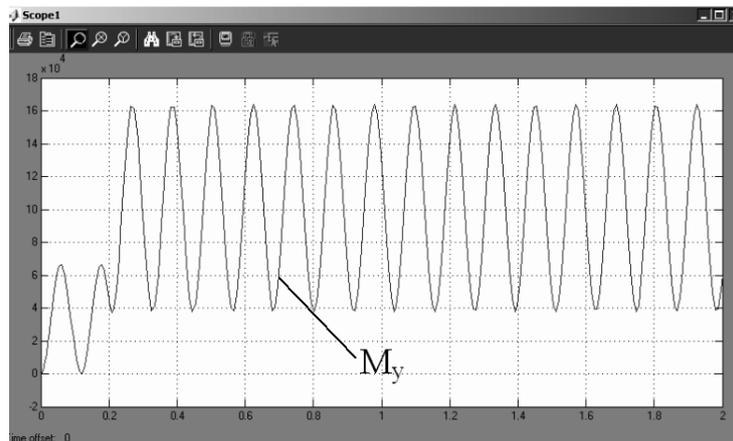
Рисунок Б.4 – Математическая модель в среде пакета Matlab



a



б



в

*a, б – угловая скорость двигателя и механизма соответственно;
в – колебания момента упругого*

Рисунок Б.5 – Кривые переходных процессов, полученные путем моделирования

Ход работы

1 Записать уравнение динамики двухмассовой механической передачи механизма (на основании рис. Б.1 и выражений (Б.1), (Б.2), (Б.3)).

2 Составить структурную схему двухмассовой расчетной схемы механической передачи без учета внутреннего демпфирования и получить передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям.

3 Выполнить расчет переходных процессов с применением пакета MathCAD.

4 Составить математическую модель в пакете Matlab и исследовать переходные процессы, определив показатели качества процессов.

5 Оформить отчет и сделать выводы по результатам исследования.

Индивидуальное задание

Согласно варианту (вариант – номер студента по списку журнала группы) и таблице Б.1, приведенной ниже, а также данным таблицы В.1 выполнить исследование механической части электропривода, выявить закономерности управления и оценить полученные результаты.

Таблица Б.1

№	Частота $\Omega_{12}, \text{с}^{-1}$	Коэф-т соотношения инерционных масс, Γ
1	31,4	1,2
2	62,8	1,3
3	94,2	1,4
4	125,6	1,5
5	31,4	2,0
6	62,8	2,5
7	94,2	3,0
8	125,6	3,5
9	31,4	4,0
10	62,8	1,2
11	94,2	1,3
12	125,6	1,4
13	31,4	1,5
14	62,8	2,0
15	94,2	2,5
16	125,6	3,0
17	31,4	3,5
18	62,8	4,0
19	94,2	1,2
20	125,6	1,3

Лабораторная работа 2

Тема: Исследование влияния вязкого трения валопровода на затухание колебаний в упругой механической части электропривода.

Цель работы: выполнить исследование механической части электропривода с учетом вязкого трения валопровода, выявить закономерности управления и оценить полученные результаты.

Теоретические сведения

В механической части диссипация энергии происходит за счет естественных и искусственных факторов. Естественное рассеяние энергии приводит к демпфированию колебаний в результате внутреннего трения в материале деталей передачи, трения в кинематических парах при относительном проскальзывании поверхностей (зубчатые муфты, шпоночные соединения, универсальные шарниры шпинделей, подшипники). Естественное демпфирование в механической части привода, как правило, незначительно, поэтому для снижения амплитуд колебаний применяются специальные устройства, дополнительно вводимые в конструкцию передачи.

Если естественное демпфирование в механической части металлургических машин мало, то принимается гипотеза о представлении его эквивалентным вязким трением и тогда двухмассовая расчетная схема принимает следующий вид (рис. Б.6).

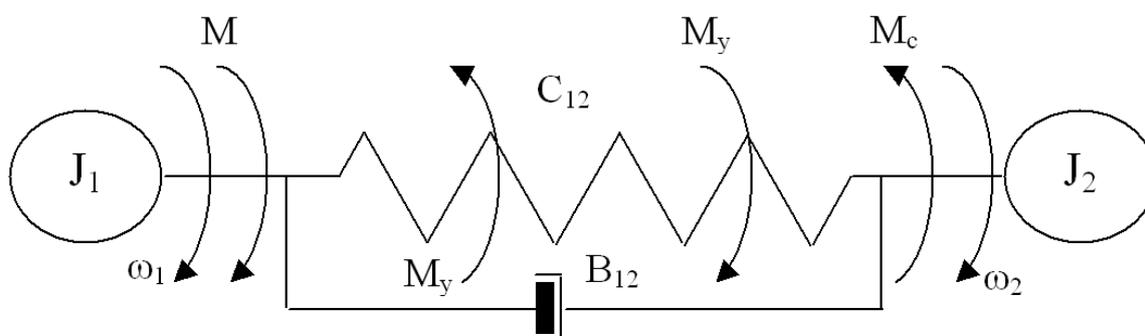


Рисунок Б.6 – Двухмассовая упруго-вязкая расчетная схема

На основании двухмассовой расчетной схемы (см. рис. Б.6) составляются дифференциальные уравнения движения в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} M - M_y &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \\ M_y - M_c &= J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}, \\ M_y &= C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - B_{12}(\omega_1 - \omega_2), \end{aligned} \right\} \quad (\text{Б.4})$$

где φ_1, φ_2 – углы закручивания дискретных масс двигателя (J_1) и механизма (J_2);

B_{12} – коэффициент вязкого трения.

Составим структурную схему на основании двухмассовой расчетной схемы (см. рис. Б.6), которая приведена на рисунке Б.7.

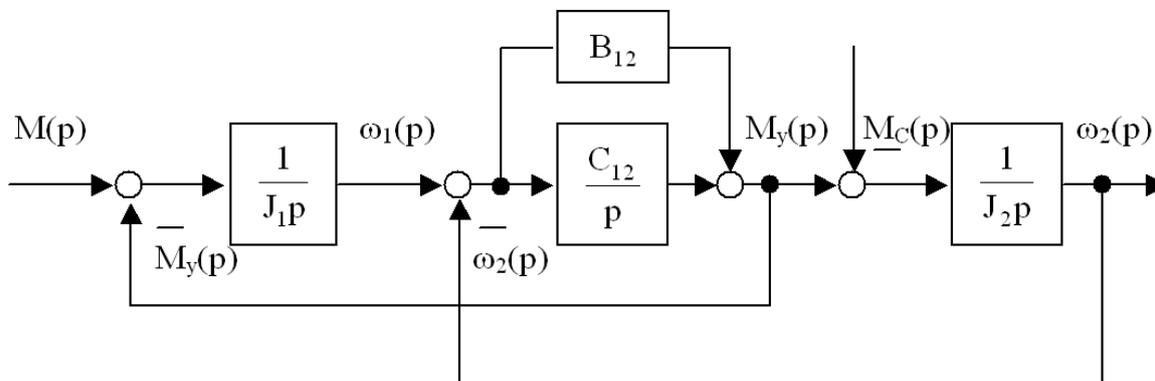


Рисунок Б.7 – Структурная схема двухмассовой расчетной схемы механической передачи с учетом вязкого трения валопровода

Согласно данной структурной схеме выводятся передаточные функции по управляющему $W_{упр}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)}$ и возмущающему $W_{возм}(p) = \frac{M_y(p)}{M_C(p)}$ воздействиям по правилам преобразования структурных схем с параллельным, последовательным и встречно-параллельным соединением звеньев.

Полученные передаточные функции подвергаются обратному преобразованию Лапласа в пакете MathCAD функцией invlaplace с целью получения кривых переходных процессов (рис. Б.8).

$$W(p) := \frac{1 + Td1 \cdot p}{\gamma \cdot J1 \cdot p \cdot \left[\left(\frac{1}{\Omega_{12}^2} \right) \cdot p^2 + Td1 \cdot p + 1 \right]}$$

$$H(p) := \frac{W(p)}{p}$$

$$H(p) \begin{cases} \text{invlaplace, p} \\ \text{simplify} \rightarrow 1.25 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1.99 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-3.14t) \cdot \sin(62.7t) \\ \text{float, 3} \end{cases}$$

$$h(t) := 1.25 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1.99 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-3.14t) \cdot \sin(62.7t)$$

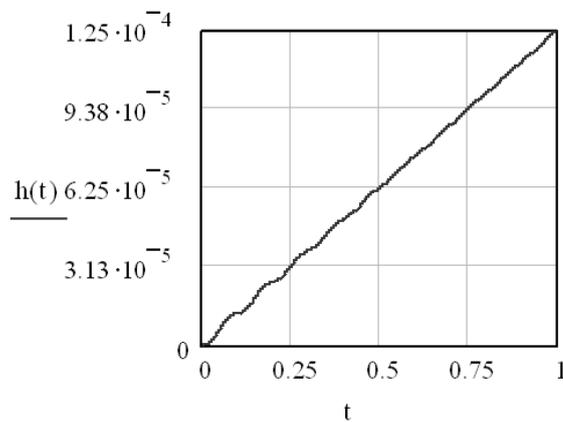


Рисунок Б.8 – График переходного процесса

По структурной схеме составляется модель в среде Matlab с учетом численных значений параметров и проводится исследование переходных процессов (для скорости механизма и двигателя, момента упругого) с оценкой показателей качества (степень затухания η , колебательность μ , время регулирования t_p , перерегулирование σ), которую можно производить визуально по графикам или на основании корней характеристического уравнения – знаменателя передаточных функций.

Графики переходных процессов и показатели качества могут не соответствовать технологически обоснованным требованиям (например, высокий уровень колебательности), поэтому система нуждается в коррекции с целью оптимизации переходных процессов. В данном случае предлагается оптимизация по критерию минимума колебательности, которая осуществляется путем расчета оптимального коэффициента вязкого трения B_{12} ($B_{12} = 2 \cdot \xi \cdot \frac{1}{\Omega_{12}} \cdot C_{12}$) по оптимальному значению коэффициента демпфирования $\xi_{\text{ОПТ}} = \frac{\sqrt{2}}{2}$ (такое значение демпфирования используется для оптимизации всех вариантов).

Ход работы

1 Записать уравнение динамики двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) с учетом вязкого трения валопровода (определить через заданный согласно варианту коэффициент затухания ξ).

2 Составить структурную схему двухмассовой ЭМС с учетом вязкого трения валапровода и получить передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям.

3 Составить математическую модель в пакете Matlab и исследовать переходные процессы, оценив влияние вязкого трения валапровода на затухание процессов в упругой механической подсистеме.

4 Выполнить оптимизацию процессов по критерию минимума колебательности.

5 Оформить отчет и сделать выводы по результатам исследования.

Индивидуальное задание

Согласно варианту и таблице Б.2, приведенной ниже, а также данным таблицы В.1, выполнить исследование механической части электропривода с учетом вязкого трения валапровода, выявить закономерности управления и оценить полученные результаты:

Таблица Б.2

№	ξ	№	ξ
Нечетный	0,05	Четный	0,1

Лабораторная работа 3

Тема: Исследование влияния жесткости механической характеристики электродвигателя на демпфирующие свойства электромеханической системы электропривода.

Цель работы: выполнить исследование влияния жесткости механической характеристики электродвигателя на затухание колебаний в упругой механической части электромеханической системы привода, выявить закономерности управления и оценить полученные результаты.

Теоретические сведения

Для современных электроприводов с быстродействующей системой автоматического управления и двигателями большой перегрузочной способности характерно в динамике проявление взаимосвязи и взаимовлияния механических и электромагнитных процессов. Электромагнитная подсистема привода в той или иной степени взаимосвязана с механической подсистемой переменными в соответствии с уравнением механической характеристики $\omega_1=f(M)$. В уравнении

механической характеристики заключена информация о мере взаимосвязи подсистем, которая оценивается по степени изменения скорости ω_1 при изменениях электромагнитного момента M (или наоборот). Степень изменения электромагнитного момента определяется линейной зависимостью для статической характеристики:

$$M = M_{K3} - \beta\omega_1, \quad (Б.5)$$

где M_{K3} – момент, развиваемый электродвигателем при приложенном напряжении и неподвижном якоре ($\omega_1 = 0$);

β – коэффициент жесткости механической характеристики.

Степень изменения угловой скорости при изменении момента электромагнитной подсистемы принято характеризовать коэффициентом жесткости механической характеристики в виде модуля отношения:

$$\beta = \left| \frac{\Delta M}{\Delta \omega} \right|. \quad (Б.6)$$

Двигатели имеют высокую линейность изменения угловой скорости в зависимости от питающего напряжения. Пренебрегая влиянием диссипативных сил механической подсистемы ($B_{12}=0$), оценим демпфирующее действие электродвигателя в полной ЭМС на основании двухмассовой расчетной схемы, для которой составляется система уравнений (Б.7):

$$\left. \begin{aligned} M - M_y &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \\ M_y - M_c &= J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}, \\ M_y &= C_{12}(\phi_1 - \phi_2), \\ M &= \beta(\omega_0 - \omega_1), \end{aligned} \right\} \quad (Б.7)$$

где ω_1 – идеальная скорость холостого хода двигателя;

β – коэффициент статической жесткости механической характеристики двигателя.

На основании двухмассовой расчетной схемы и системы дифференциальных уравнений (Б.7) составим структурную схему, которая представлена на рисунке Б.9.

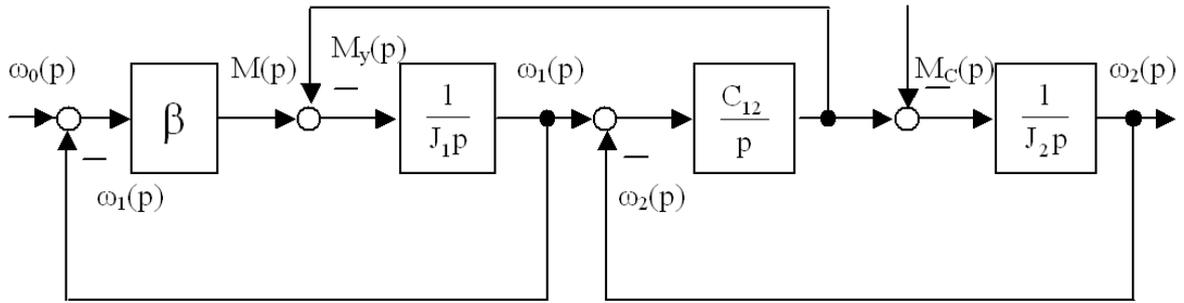


Рисунок Б.9 – Структурная схема электромеханической системы привода с учетом жесткости механической характеристики двигателя

Согласно данной структурной схеме выводятся передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям, которые подвергаются обратному преобразованию Лапласа в пакете MathCAD функцией `invlaplace` с целью получения кривых переходных процессов (рис. Б.10).

По структурной схеме составляется модель в среде Matlab с учетом численных значений параметров и проводится исследование переходных процессов (для скорости механизма и двигателя, момента упругого) с оценкой показателей качества (степень затухания η , колебательность μ , время регулирования t_p , перерегулирование σ), которую можно производить визуально по графикам или на основании корней характеристического уравнения – знаменателя передаточных функций.

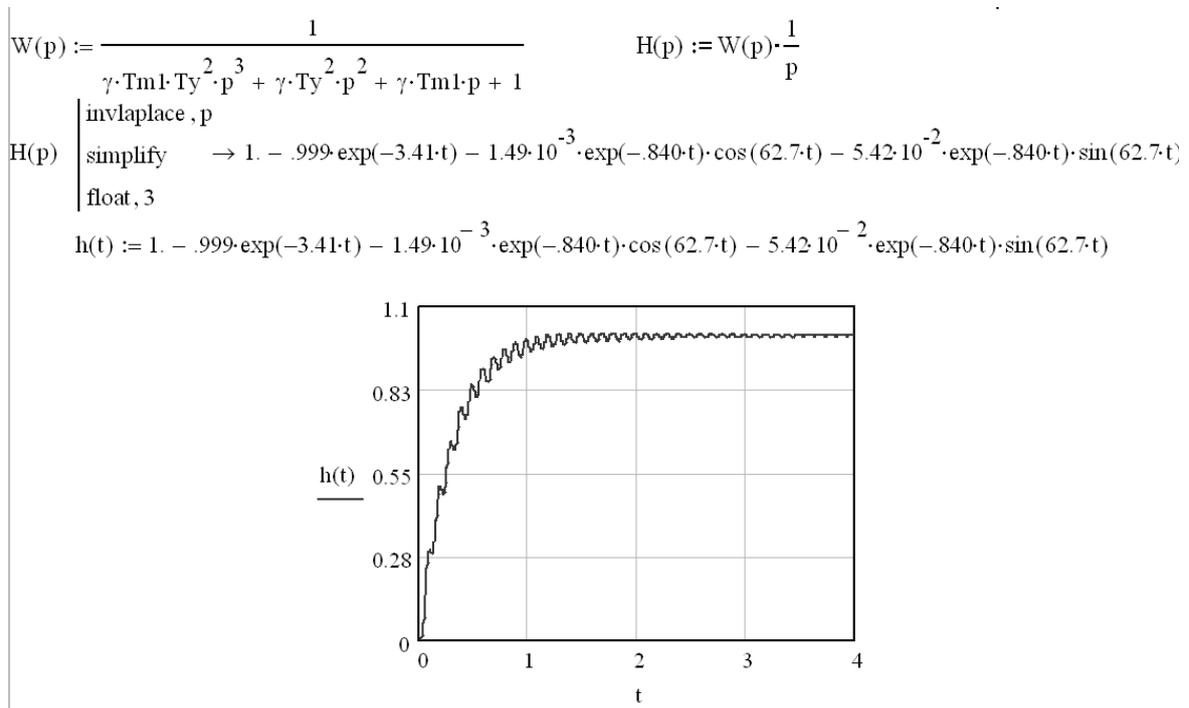


Рисунок Б.10 – Расчет и построение графика переходного процесса

Графики переходных процессов и показатели качества могут свидетельствовать о том, что параметры системы не соответствуют

технологически обоснованным требованиям (например, высокий уровень колебательности), а значит, система нуждается в коррекции с целью оптимизации переходных процессов.

В данном случае предлагается оптимизация по критерию минимума колебательности, которая осуществляется путем расчета оптимального значения жесткости механической характеристики β (за счет введения добавочного сопротивления для вариации величины скольжения для искусственной характеристики двигателя $S_{\text{Киск}} = \frac{R_2 + R_{2\text{доб}}}{\sqrt{R_1^2 + X_2^2}}$ (естественная характеристика определяется согласно $S_{\text{Кест}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_2^2}}$)).

Ход работы

1 Записать уравнение динамики двухмассовой ЭМС с учетом механической характеристики электродвигателя (β).

2 Определить величину β для своего типа двигателя (согласно таблице В.1).

3 Составить структурную схему двухмассовой ЭМС с учетом линейной механической характеристики электродвигателя и получить передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям.

4 Произвести расчет переходных процессов в пакете MathCAD, определив корни характеристического полинома передаточных функций, рассчитать показатели качества системы – степень устойчивости η , время регулирования t_p , колебательность μ и перерегулирование σ .

5 Составить математическую модель в пакете Matlab и исследовать переходные процессы, оценив влияние жесткости механической характеристики электродвигателя на затухание процессов в упругой механической подсистеме.

6 Выполнить оптимизацию системы по критерию «минимум колебательности» и оценить результаты исследования.

7 Оформить отчет и сделать выводы по результатам исследования.

Индивидуальное задание

Согласно варианту и таблице В.1 паспортных данных заданного типа двигателя выполнить исследование влияния жесткости механической характеристики электродвигателя β на демпфирующие свойства электромеханической системы электропривода (расчет β осуществлять на основании линеаризации механической характеристики, построенной по упрощенной или уточненной формуле Клосса для асинхронного двигателя,

тогда $\beta = \left| \frac{\Delta M}{\Delta \omega} \right| = \frac{2M_K}{S_K \cdot \omega_0}$).

Лабораторная работа 4

Тема: Исследование демпфирующих свойств электромеханической системы электропривода с учетом электромагнитной инерции.

Цель работы: выполнить исследование демпфирующих свойств электромеханической системы электропривода с учетом механической характеристики двигателя и электромагнитной инерции, выявить особенности управления и оценить полученные результаты.

Теоретические сведения

Как было замечено в лабораторной работе 3, для современных электроприводов с быстродействующей системой автоматического управления и двигателями большой перегрузочной способности характерно в динамике проявление взаимосвязи и взаимовлияния механических и электромагнитных процессов.

Исследование закономерностей электромеханического взаимодействия процессов в приводах машин и механизмов производится на основе двухмассовой расчетной схемы с двигателем постоянного (переменного) тока.

В действительности, электродвигатели современных электромеханических систем имеет систему питания с управляемым тиристорным преобразователем и быстродействующей системой автоматического регулирования, которая достаточно корректно эквивалентруется электромагнитной подсистемой, а именно путем коррекции величины электромагнитной постоянной времени T_{Σ} обмотки якоря (ротора), учитывающей электромагнитную инерцию.

На основании двухмассовой расчетной схемы и системы дифференциальных уравнений (Б.7) с учетом электромагнитной инерции двигателя составим структурную схему (рис. Б.11).

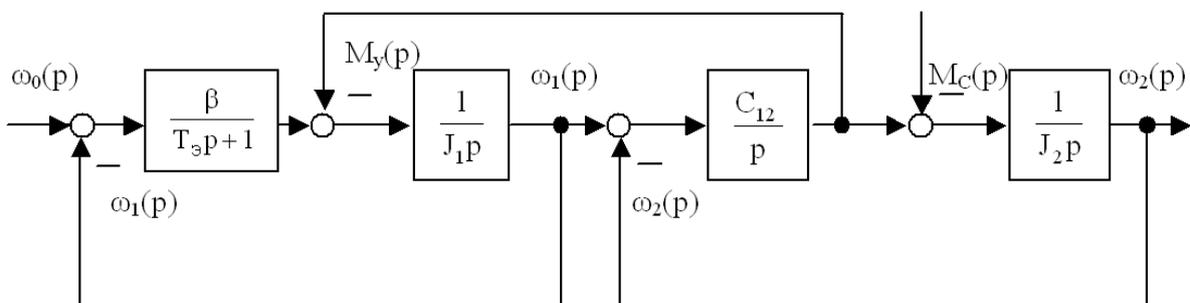


Рисунок Б.11 – Структурная схема электромеханической системы привода с линейной механической характеристикой двигателя

Согласно данной структурной схеме выводятся передаточные функции по управляющему $W_{\text{упр}}(p) = \frac{\omega_2(p)}{\omega_0(p)}$ и возмущающему $W_{\text{возм}}(p) = \frac{M_y(p)}{M_C(p)}$ воздействиям по правилам преобразования структурных схем с параллельным, последовательным и встречно-параллельным соединением звеньев.

Полученные передаточные функции подвергаются обратному преобразованию Лапласа в пакете MathCAD функцией `invlaplace` с целью получения кривых переходных процессов (рис. Б.12).

$$W(p) := \frac{1}{\gamma \cdot T_e \cdot T_{m1} \cdot T_y^2 \cdot p^4 + \gamma \cdot T_{m1} \cdot T_y^2 \cdot p^3 + \gamma \cdot (T_e \cdot T_{m1} + T_y^2) \cdot p^2 + \gamma \cdot T_{m1} \cdot p + 1}$$

$$H(p) \left\{ \begin{array}{l} \text{invlaplace, p} \\ \text{simplify} \rightarrow 1. + .422 \exp(-14.5t) - 1.44 \exp(-4.45t) + 1.51 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-7.27 \cdot 10^{-2} \cdot t) \cdot \cos(63.0t) \\ \text{float, 3} \end{array} \right.$$

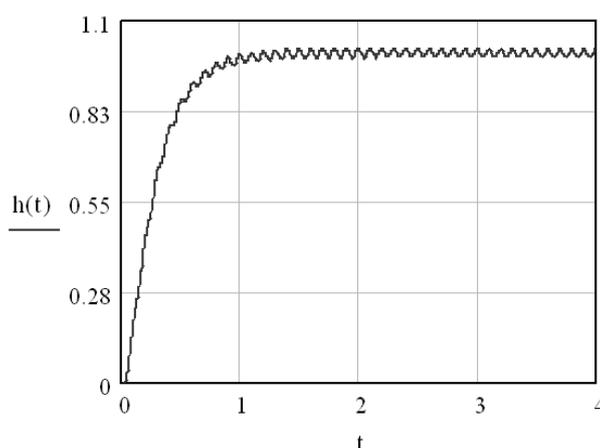


Рисунок Б.12 –График переходного процесса

По структурной схеме составляется модель в среде Matlab с учетом численных значений параметров и проводится исследование переходных процессов (для скорости механизма и двигателя, момента упругого) с оценкой показателей качества (степень затухания η , колебательность μ , время регулирования t_p , перерегулирование σ), которую можно производить визуально по графикам или на основании корней характеристического уравнения – знаменателя передаточных функций.

Графики переходных процессов и показатели качества могут свидетельствовать о том, что параметры системы не соответствуют технологически обоснованным требованиям, поэтому для системы необходимо выполнить коррекцию с целью оптимизации переходных процессов. В данном случае предлагается оптимизация по критерию минимума колебательности, реализуемая определением оптимального значения жесткости искусственной механической характеристики β и электромагнитной постоянной времени T_{Σ} (за счет введения добавочного

сопротивления для вариации величины скольжения $S_{\text{Киск}} = \frac{R_2 + R_{2\text{доб}}}{\sqrt{R_1^2 + X_2^2}}$ и
 электромагнитной постоянной времени $T_{\text{Эонт}} = \frac{1}{\omega_0 \cdot S_{\text{Киск}}}$).

Ход работы

1 Записать уравнение динамики двухмассовой ЭМС с учетом механической характеристики электродвигателя (β) и электромагнитной инерции ($T_{\text{Э}}$).

2 Определить величину β и $T_{\text{Э}}$ для своего типа двигателя (таблица В.1).

3 Составить структурную схему двухмассовой ЭМС с учетом линейной механической характеристики электродвигателя и электромагнитной инерционности, получить передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям.

4 Произвести расчет переходных процессов в пакете MathCAD, определив корни характеристического полинома передаточных функций, рассчитать показатели качества системы – степень устойчивости η , время регулирования t_p , колебательность μ и перерегулирование σ .

5 Составить математическую модель в пакете Matlab и исследовать переходные процессы, оценив влияние жесткости механической характеристики электродвигателя и электромагнитной инерционности на затухание процессов в упругой механической подсистеме.

6 Выполнить оптимизацию системы по критерию «минимум колебательности» и оценить результаты исследования (MathCAD, Matlab).

7 Оформить отчет и сделать выводы по результатам исследования.

Индивидуальное задание

Согласно варианту и таблице В.1 паспортных данных заданного типа двигателя выполнить исследование влияния жесткости механической характеристики электродвигателя β и электромагнитной инерции ($T_{\text{Э}}$) на демпфирующие свойства электромеханической системы электропривода (расчет β осуществлять на основании линеаризации механической характеристики, построенной по упрощенной или уточненной формуле

Клосса для асинхронного двигателя, тогда $\beta = \left| \frac{\Delta M}{\Delta \omega} \right| = \frac{2M_{\text{к}}}{S_{\text{к}} \cdot \omega_0}$),

проанализировать полученные результаты до и после оптимизации.

Лабораторная работа 5

Тема: Оптимизация электромеханической системы по критерию минимума колебательности.

Цель работы: выполнить исследование демпфирующих свойств электромеханической системы электропривода с учетом механической характеристики двигателя и электромагнитной инерции на основании оптимальных значений коэффициентов K_B , ξ_d , T_{M1} , T_Ω , выявить особенности управления и оценить полученные результаты, рассчитывая показатели качества.

Теоретические сведения

Двухмассовая ЭМС, структурная схема которой (рис. Б.11) учитывает динамические характеристики электродвигателей, дает возможность выявить закономерности взаимодействия механических и электромагнитных процессов в приводах машин. С формальной точки зрения процессы в механической и электрической подсистемах полной электромеханической системы всегда в той или иной мере взаимодействуют. В результате механических колебаний привода (колебания массы J_2) через упругую связь вовлекается в колебательное движение ротор (якорь) двигателя (колебания массы J_1). Колебательный характер движения ротора с угловой скоростью ω_1 приводит к возникновению дополнительной ЭДС и, соответственно, тока и электромагнитного момента двигателя. Вследствие индуктивности электромеханический колебательный процесс обеспечивается обменом энергии между ее электрическим и механическим накопителями. Колебания тока якоря приводят к постепенному рассеиванию энергии механических колебаний в виде тепла в сопротивлениях якорной цепи. В этом заключается демпфирующее действие электропривода – возникающие в механической подсистеме колебания быстро затухают.

Интенсивность процесса обмена энергией между механической (МП) и электрической (ЭП) подсистемами определяется характером их взаимодействия. Если ЭП и МП рассматривать как отдельные парциальные подсистемы, составляющие полную ЭМС, то характер взаимодействия между ними существенно определяется близостью друг к другу парциальных частот подсистем (коэффициентом K_B).

Близость частот МП и ЭП представляется математически выражением

$$\Omega_{12}^2 = K_B \Omega_\Omega^2, \quad (\text{Б.8})$$

где Ω_{12}^2 – парциальная частота механической подсистемы;

Ω_Ω^2 – парциальная частота электрической подсистемы.

Если воспользоваться терминами и определениями теории колебаний, то выражение (Б.8) можно представить и так:

$$K_{\text{в}} = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_{\text{э}}^2}, \quad (\text{Б.9})$$

где $K_{\text{в}}$ – коэффициент электромеханического взаимодействия.

Критерий (Б.9) выражается через параметры ЭП и МП следующим образом:

$$T_{\text{м1}} T_{\text{э}} = K_{\text{в}} T_{\text{y}}^2, \quad (\text{Б.10})$$

где $T_{\text{y}} = 1/\Omega_{12}$ – постоянная времени упругих колебаний двухмассовой систем;

$T_{\text{м1}} = J_1/\beta$ – электромеханическая постоянная времени электродвигателя; здесь J_1 – момент инерции якоря (ротора) двигателя.

В данной лабораторной работе необходимо выполнить исследование переходных процессов ЭМС, взяв за основу структурную схему лабораторной работы 4, оценить влияние жесткости механической характеристики электродвигателя и электромагнитной инерционности на затухание процессов в упругой механической подсистеме с учетом оптимальных параметров согласно теории электромеханического взаимодействия с настройкой по критерию минимума колебательности.

Оптимизацию электромеханической системы по критерию минимума колебательности в данном случае необходимо выполнить на основании теории электромеханического взаимодействия процессов в электрической и механической подсистемах.

В этом случае после вывода передаточных функций по управляющему и возмущающему воздействиям для исследования системы рассматривается характеристический полином – знаменатель передаточных функций.

Согласно канонической форме записи колебательного звена

$$T_0 p^2 + 2\xi_{\text{эд}} T_0 p + 1 = 0, \quad (\text{Б.11})$$

с учетом критического предельного случая максимума взаимодействия в ЭМС ЭП описывается следующим уравнением

$$T_{\text{м1}} T_{\text{э}} p^2 + T_{\text{м1}} p + 1 = 0. \quad (\text{Б.12})$$

Откуда, приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях уравнений, получаем следующие соотношения для параметров ЭМС:

$$K_B = \frac{T_{M1} \cdot T_{\Theta}}{T_y^2}, \quad (B.13)$$

$$\xi_d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{M1}}{T_{\Theta}}}. \quad (B.14)$$

Электропривод при электромеханическом взаимодействии способствует отводу энергии механических колебаний МП в электрическую подсистему и ее последующему поглощению имеющимися там диссипативными элементами (активными сопротивлениями цепи) или возврату в питающую сеть. Упругие механические колебания в МП при убывании энергии, соответственно, с течением времени затухают – в этом и заключается эффект демпфирующего действия электропривода. ЭП в данном случае выступает в качестве управляемого активного электродинамического гасителя колебаний.

При этом электромеханическое взаимодействие в электроприводе достигает предельных значений максимума при строгом соблюдении двух условий: оптимальной близости частот ЭП и МП с коэффициентом $K_B = K_B^*$ и оптимальном значении коэффициента демпфирования ЭП, когда $\xi_d = \xi_d^*$, которые определяются следующими зависимостями:

$$K_B = K_B^* = \frac{1}{\gamma}, \quad (B.15)$$

$$\xi_d = \xi_d^* = \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \quad (B.16)$$

Рассматривая совместно выражения (B.13)...(B.16), получаем зависимости для определения расчетных (B.17), (B.18) и оптимальных (B.19)...(B.21) значений параметров T_{M1} и T_{Θ} :

$$T_{M1} = 2\sqrt{K_B} T_y \xi_d, \quad (B.17)$$

$$T_{\Theta} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{K_B} \cdot T_y}{\xi_d}, \quad (B.18)$$

$$T_{M1}^* = \frac{2\sqrt{\gamma-1} \cdot T_y}{\gamma}, \quad (B.19)$$

$$T_{\Theta}^* = \frac{T_y}{2\sqrt{\gamma-1}}, \quad (B.20)$$

$$\beta^* = \frac{J_1}{T_{M1}^*} = \frac{J_1 \cdot \gamma}{2\sqrt{\gamma-1} \cdot T_y} \quad (\text{Б.21})$$

Таким образом, последовательность определения передаточных функций и их преобразование по Лапласу с целью получения кривых переходных процессов аналогична лабораторной работе 4, однако, кроме этого, необходимо обязательно определить корни характеристического уравнения с применением функции polyroots математического пакета MathCAD (рис. Б.13).

$$W(p) := \frac{1}{\gamma \cdot T_e \cdot T_{M1} \cdot T_y^2 \cdot p^4 + \gamma \cdot T_{M1} \cdot T_y^2 \cdot p^3 + \gamma \cdot (T_e \cdot T_{M1} + T_y^2) \cdot p^2 + \gamma \cdot T_{M1} \cdot p + 1}$$

$$\text{polyroots} \left[\begin{array}{c} 1 \\ \gamma \cdot T_{M1} \\ \gamma \cdot (T_e \cdot T_{M1} + T_y^2) \\ \gamma \cdot T_{M1} \cdot T_y^2 \\ \gamma \cdot T_e \cdot T_{M1} \cdot T_y^2 \end{array} \right] = \begin{pmatrix} -14.455 \\ -4.448 \\ -0.073 + 63.037i \\ -0.073 - 63.037i \end{pmatrix}$$

$$H(p) \left\{ \begin{array}{l} \text{invlaplace, p} \\ \text{simplify} \\ \text{float, 3} \end{array} \right. \rightarrow 1. + .422 \exp(-14.5t) - 1.44 \exp(-4.45t) + 1.51 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-7.27 \cdot 10^{-2} \cdot t) \cdot \cos(63.0t)$$

$$h(t) := 1. + .422 \cdot \exp(-14.5 \cdot t) - 1.44 \cdot \exp(-4.45 \cdot t) + 1.51 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-7.27 \cdot 10^{-2} \cdot t) \cdot \cos(63.0 \cdot t)$$

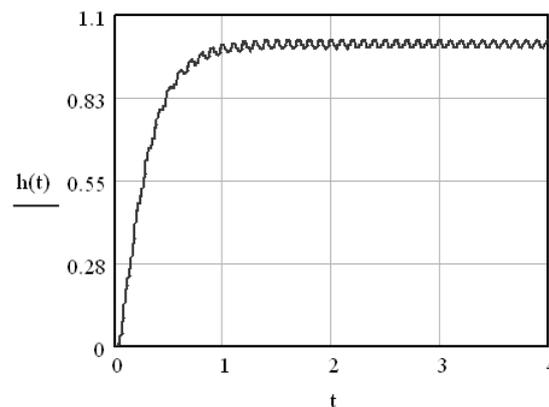


Рисунок Б.13 – Расчет корней ХП и построение графика переходного процесса

По структурной схеме составляется модель в среде Matlab с учетом численных значений параметров и проводится исследование переходных процессов (для скорости механизма и двигателя, момента упругого) с оценкой показателей качества (степень затухания η , колебательность μ , время регулирования t_p , перерегулирование σ), которую можно производить визуально по графикам или на основании корней характеристического уравнения – знаменателя передаточных функций.

Графики переходных процессов и показатели качества могут свидетельствовать о том, что параметры системы не соответствуют

технологически обоснованным требованиям, поэтому для системы необходимо выполнить коррекцию с целью оптимизации переходных процессов. В данном случае предлагается оптимизация по критерию минимума колебательности, реализуемая по теории электромеханического взаимодействия с определением оптимального значения жесткости искусственной механической характеристики β , электромагнитной постоянной времени T_{Σ} и электромеханической постоянной времени T_{M1} (за счет подстановки выражений для определения оптимальных величин согласно выражениям (Б.15), (Б.16), (Б.19)...(Б.21)).

Ниже приведена реализация оптимизации, корни характеристического уравнения и график оптимального переходного процесса (рис. Б.14).

$$W(p) := \frac{1}{\gamma \cdot T_{\Sigma} \cdot T_{M1} \cdot T_{\Sigma}^2 \cdot p^4 + \gamma \cdot T_{M1} \cdot T_{\Sigma}^2 \cdot p^3 + \gamma \cdot (T_{\Sigma} \cdot T_{M1} + T_{\Sigma}^2) \cdot p^2 + \gamma \cdot T_{M1} \cdot p + 1}$$

$$\text{polyroots} \left[\begin{array}{c} 1 \\ \gamma \cdot T_{M1} \\ \gamma \cdot (T_{\Sigma} \cdot T_{M1} + T_{\Sigma}^2) \\ \gamma \cdot T_{M1} \cdot T_{\Sigma}^2 \\ \gamma \cdot T_{\Sigma} \cdot T_{M1} \cdot T_{\Sigma}^2 \end{array} \right] = \begin{pmatrix} -22.107 + 58.792i \\ -22.102 - 58.782i \\ -22.096 - 58.785i \\ -22.091 + 58.774i \end{pmatrix}$$

$$H(p) \begin{cases} \text{invlaplace, p} \\ \text{simplify} \\ \text{float, 2} \end{cases} \rightarrow 1. - 1.0 \exp(-27 \cdot t) \cdot \cos(60 \cdot t) + 3.4 \exp(-27 \cdot t) \cdot \sin(60 \cdot t) + 9.010^{-3} \exp(-18 \cdot t) \cdot \cos(58 \cdot t)$$

$$h(t) := 1. - 1.0 \exp(-27 \cdot t) \cdot \cos(60 \cdot t) + 3.4 \exp(-27 \cdot t) \cdot \sin(60 \cdot t) + 9.010^{-3} \exp(-18 \cdot t) \cdot \cos(58 \cdot t)$$

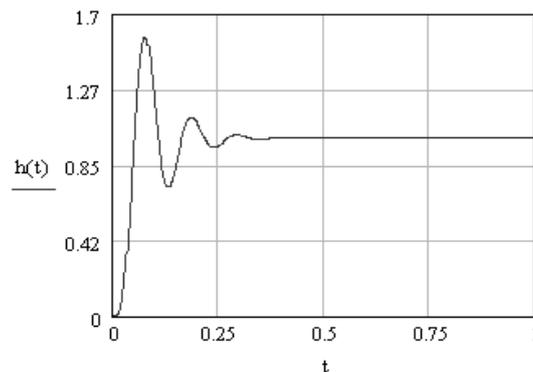


Рисунок Б.14 – Расчет оптимального процесса и построение кривой оптимального переходного процесса

Ход работы

1 Записать уравнение динамики двухмассовой ЭМС с учетом механической характеристики электродвигателя (β) и электромагнитной инерции (T_{Σ}).

2 Определить величину β и T_{Σ} согласно своему варианту.

3 Составить структурную схему двухмассовой ЭМС с учетом линейной механической характеристики электродвигателя и электромагнитной инерционности, получить передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям.

4 Применив зависимости для определения оптимальных значений параметров K_B , ξ_d , T_{M1} , T_Δ , согласно теории электромеханического взаимодействия, представить характеристический полином в форме обобщенных параметров.

5 Произвести расчет переходных процессов в пакете MathCAD, определив корни характеристического полинома передаточных функций, рассчитать показатели качества системы – степень устойчивости η , время регулирования t_p , колебательность μ и перерегулирование σ для случая настройки системы по исходным параметрам и оптимальным.

6 Составить математическую модель в пакете Matlab и исследовать переходные процессы, оценив влияние жесткости механической характеристики электродвигателя и электромагнитной инерционности на затухание процессов в упругой механической подсистеме с учетом оптимальных параметров с настройкой по критерию минимума колебательности.

7 Выполнить оптимизацию системы по критерию «минимум колебательности» на основании теории электромеханического взаимодействия и оценить результаты исследования (MathCAD, Matlab).

8 Оформить отчет и сделать выводы по результатам исследования.

Индивидуальное задание

Согласно варианту и таблице В.1 паспортных данных заданного типа двигателя выполнить исследование демпфирующих свойств ЭМС привода с учетом влияния жесткости механической характеристики электродвигателя β и электромагнитной инерции T_Δ на основании оптимальных значений коэффициентов K_B , ξ_d , T_{M1} , T_Δ (расчет β осуществлять на основании линеаризации механической характеристики, построенной по упрощенной или уточненной формуле Клосса для асинхронного двигателя, тогда $\beta = \left| \frac{\Delta M}{\Delta \omega} \right| = \frac{2M_K}{S_K \cdot \omega_0}$) и выявить особенности управления с оценкой полученных результатов до и после оптимизации.

Лабораторная работа 6

Тема: Электромеханическое взаимодействие в электроприводе с регламентацией демпфирующего действия в ЭМС.

Цель работы: выполнить исследование демпфирующих свойств электромеханической системы электропривода с перераспределением демпфирования (ξ_M, ξ_D) на основании оптимальных значений коэффициентов $K_B, \xi_D, T_{M1}, T_{\Sigma}$, выявить особенности управления и оценить полученные результаты, рассчитав показатели качества

Теоретические сведения

На основании теории электромеханического взаимодействия динамические свойства ЭМС тяжелых металлургических машин полностью определяются безразмерными обобщенными параметрами: коэффициентом электромеханического взаимодействия K_B ; коэффициентом демпфирования электродвигателя ξ_D ; коэффициентом распределения инерционных масс γ . Постоянная времени T_y является своеобразным масштабом времени для динамического процесса электромеханического взаимодействия.

Форма нормирования характеристического уравнения с использованием обобщенных показателей K_B, ξ_D, γ компактна, значительно упрощает анализ исходной двухмассовой ЭМС и дает возможность судить о свойствах системы в целом по свойствам ее отдельных подсистем (МП и ЭП).

Обобщенные показатели электромеханического взаимодействия K_B, ξ_D, γ наглядно раскрывают взаимосвязь параметров МП и ЭП, имеют физический смысл и вполне определенные граничные значения для промышленных типов машин и механизмов. Нормированная форма записи позволяет в общем виде провести анализ демпфирующего действия электропривода в разомкнутой системе.

При электромеханическом взаимодействии в системе с оптимальными параметрами возможна такая комплектация корней характеристического полинома, когда при предельном значении коэффициента электромеханической взаимосвязи K_B (Б.15) огибающая колебательных процессов в ЭП и МП будет различна и полином представится, как

$$Q(p) = (T_y^2 p^2 + 2\xi_{\Sigma} T_y p + 1) \cdot (T_y^2 p^2 + 2\xi_M T_y p + 1), \quad (Б.22)$$

где ξ_{Σ}, ξ_M – коэффициенты демпфирования процессов в ЭП и МП соответственно, когда априори $\xi_{\Sigma} \neq \xi_M$.

Выполнив преобразование полинома (20) и сравнив его коэффициенты при всех степенях с аналогичными коэффициентами характеристического уравнения, полученного в лабораторных работах 4 и 5, получим соотношения для обобщенных параметров:

$$K_B = K_B^* = 1/\gamma, \quad (Б.23)$$

$$\xi_M + \xi_{\Sigma} = \sqrt{\gamma} \xi_D, \quad (Б.24)$$

$$4\xi_M \cdot \xi_{\text{Э}} = \gamma - 1. \quad (\text{Б.25})$$

Следовательно:

$$\xi_{\text{Д}} = \frac{\xi_M + \xi_{\text{Э}}}{\sqrt{\gamma}}. \quad (\text{Б.26})$$

Чтоб определить оптимальные соотношения для постоянных времени $T_{\text{Э}}$ и $T_{\text{М1}}$, выполним подстановку выражения (Б.26) в уравнения (Б.17) и (Б.18):

$$T_{\text{М1}} = \frac{2}{\gamma} (\xi_M + \xi_{\text{Э}}) T_y, \quad (\text{Б.27})$$

$$T_{\text{Э}} = \frac{T_y}{2(\xi_M + \xi_{\text{Э}})}. \quad (\text{Б.28})$$

В общем случае электромеханического взаимодействия демпфирование, вносимое собственно электроприводом в механическую подсистему, удобно выразить так:

$$\xi_M = m\xi_{\text{Э}}, \quad (\text{Б.29})$$

где $0 < m \leq 1$ – коэффициент веса ($m = 1$ – предельный случай, когда процессы в ЭП и МП тождественны, т. е. $\xi^* = \xi_M = \xi_{\text{Э}} = 0,5\sqrt{\gamma-1}$).

Учитывая оптимальное значение $\xi_{\text{Д}}$ (Б.16), получим такие соотношения для параметров ЭМС:

$$K_{\text{в}} = K_{\text{в}}^* = 1/\gamma;$$

$$\xi_{\text{Э}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma-1}{m}}; \quad (\text{Б.30})$$

$$\xi_M = \frac{1}{2} \sqrt{m(\gamma-1)}; \quad (\text{Б.31})$$

$$\xi_{\text{Д}} = \frac{m+1}{2\sqrt{m}} \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \quad (\text{Б.32})$$

Зависимости (Б.30)...(Б.32) важны для инженеров-проектировщиков ЭМС, когда в заданных условиях требований технологического процесса можно обеспечивать требуемые динамические показатели координат, соответствующие определенным настройкам путем регламентации выбора требуемого коэффициента веса m .

В данной работе, после нахождения передаточных функций характеристического полинома, как в лабораторной работе 5, определения корней характеристического уравнения и построения кривых переходных процессов, необходимо выполнить оптимизацию переходных процессов по критерию минимума колебательности на основании теории электромеханического взаимодействия (коэффициента веса $m = 0,5$), рассчитав оптимальные величины по выражениям (Б.30)...(Б.32).

Также необходимо вычислить корни уравнения и подставить полученные значения в математическую модель, набранную в среде пакета Matlab, тем самым показав, что после оптимизации переходные процессы (рис. Б.15) в ЭМС удовлетворяют требованиям технологического процесса.

$$W(p) := \frac{1}{\gamma \cdot T_e \cdot T_{m1} \cdot T_y^2 \cdot p^4 + \gamma \cdot T_{m1} \cdot T_y^2 \cdot p^3 + \gamma \cdot (T_e \cdot T_{m1} + T_y^2) \cdot p^2 + \gamma \cdot T_{m1} \cdot p + 1}$$

$$\text{polyroots} \left[\begin{array}{c} 1 \\ \gamma \cdot T_{m1} \\ \gamma \cdot (T_e \cdot T_{m1} + T_y^2) \\ \gamma \cdot T_{m1} \cdot T_y^2 \\ \gamma \cdot T_e \cdot T_{m1} \cdot T_y^2 \end{array} \right] = \begin{array}{c} (-22.107 + 58.792i) \\ (-22.102 - 58.782i) \\ (-22.096 - 58.785i) \\ (-22.091 + 58.774i) \end{array}$$

$$H(p) \left| \begin{array}{l} \text{invlaplace, p} \\ \text{simplify} \\ \text{float, 2} \end{array} \right. \rightarrow 1. - 1.0 \exp(-27:t) \cdot \cos(60:t) + 3.4 \exp(-27:t) \cdot \sin(60:t) + 9.010^{-3} \exp(-18:t) \cdot \cos(58:t)$$

$$h(t) := 1. - 1.0 \exp(-27:t) \cdot \cos(60:t) + 3.4 \exp(-27:t) \cdot \sin(60:t) + 9.010^{-3} \exp(-18:t) \cdot \cos(58:t)$$

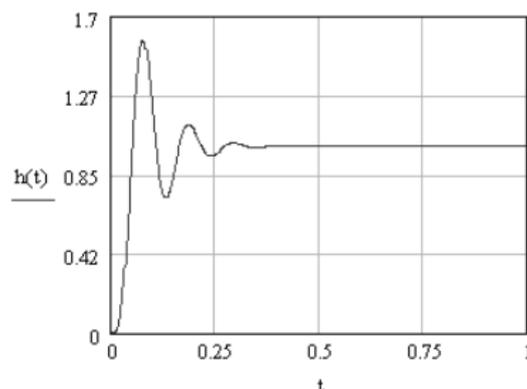


Рисунок Б.15 – Фрагмент расчета параметров ЭМС и построение графика переходного процесса после оптимизации

Ход работы

1 Записать уравнение динамики двухмассовой ЭМС с учетом механической характеристики электродвигателя β и электромагнитной инерции $T_{\text{Э}}$.

2 Определить величину β и $T_{\text{Э}}$ согласно своему варианту.

3 Составить структурную схему двухмассовой ЭМС с учетом линейной механической характеристики электродвигателя и электромагнитной инерционности, получить передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям.

4 Применяя зависимости для определения оптимальных значений параметров $K_{\text{В}}$, $\xi_{\text{Д}}$, $T_{\text{М1}}$, $T_{\text{Э}}$ согласно теории электромеханического взаимодействия представить характеристический полином в форме обобщенных параметров, а также рассматривая тождественность протекания процессов в механической и электрической подсистемах.

5 Найти соотношения коэффициентов демпфирования $\xi_{\text{М}}$ и $\xi_{\text{Э}}$ относительно величины демпфирования двигателя $\xi_{\text{Д}}$ с учетом перераспределения долей демпфирования электрической и механической частей (взяв $m = 0,5$).

6 Произвести расчет переходных процессов в пакете MathCAD, определив корни характеристического полинома передаточных функций, рассчитать показатели качества системы – степень устойчивости η , время регулирования $t_{\text{р}}$, колебательность μ и перерегулирование σ для случая настройки системы по исходным параметрам и оптимальным.

7 Составить математическую модель в пакете Matlab и исследовать переходные процессы, оценив влияние соотношений коэффициентов демпфирования $\xi_{\text{М}}$ и $\xi_{\text{Э}}$ на затухание процессов в упругой механической подсистеме с учетом оптимальных параметров.

8 Оформить отчет и сделать выводы по результатам исследования.

Лабораторная работа 7

Тема: Влияние обратной связи по скорости на демпфирующее действие электропривода.

Цель работы: выполнить исследование влияния настройки контура регулирования скорости на демпфирующую способность электропривода с учетом фактических и оптимальных значений постоянных времени $T_{\text{М1}}$, $T_{\text{Э}}$, жесткости механической характеристики двигателя β , выявить особенности управления и оценить полученные результаты, рассчитывая показатели качества.

Теоретические сведения

В предыдущих лабораторных работах рассматривалась электромеханическая система без учета системы автоматического управления. В данной работе рассмотрим замкнутую систему, представленную на рисунке Б.16, и оценим влияние обратных связей (в данном случае по скорости) на протекающие процессы.

После определения передаточных функций для данной структурной схемы по управляющему $W_{\text{упр}}(p) = \frac{\omega_2(p)}{U_3(p)}$ и возмущающему $W_{\text{возм}}(p) = \frac{M_y(p)}{M_c(p)}$ воздействиям, также необходимо исследовать систему на основании характеристического полинома, который имеет следующий вид:

$$W_{\text{упр}}(p) = \frac{K_p \cdot K_d}{1 + K_p \cdot K_c \cdot K_d} \cdot \frac{1}{\gamma T_{\text{М1}}^* T_{\text{Э}} T_y^2 p^4 + \gamma T_{\text{М1}}^* T_y^2 p^3 + \gamma (T_{\text{М1}}^* T_{\text{Э}} + T_y^2) p^2 + \gamma T_{\text{М1}}^* p + 1},$$

где $K_d = 1/k\Phi_H$ – коэффициент пропорциональности двигателя;

$T_{\text{М1}}^* = T_{\text{М1}} / (1 + K_p K_c K_d) = J_1 / \beta (1 + K_p K_c K_d)$ – электромеханическая постоянная времени полной САУ;

$\beta^* = \beta (1 + K_p K_c K_d)$ – жесткость механической характеристики полной САУ.

Поскольку переходные процессы зачастую нуждаются в оптимизации, то в данной работе это реализуется с учетом вышеприведенных выражений, а также выражений (Б.19)...(Б.21), являющихся основой для определения оптимального значения коэффициента пропорциональности регулятора скорости:

$$K_p^* = \frac{\beta^* - 1}{K_c \cdot K_d}. \quad (\text{Б.33})$$

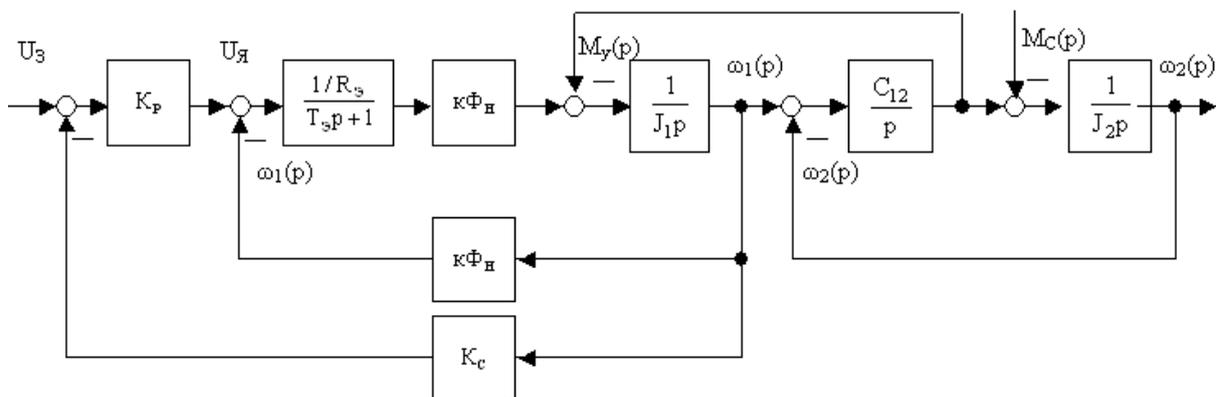


Рисунок Б.16 – Структурная схема двухмассовой ЭМС с системой автоматического регулирования

Таким образом, с учетом уравнения (Б.33) будут получены скорректированные параметры замкнутой системы, которые в последствие будут подставлены в модель, а уже результаты моделирования позволят сделать вывод об оптимальности ЭМС.

Ход работы

1 Записать уравнение динамики двухмассовой ЭМС с учетом механической характеристики электродвигателя (β), электромагнитной инерции ($T_{\text{Э}}$), электромеханической постоянной времени (T_{M1}) с учетом обратной связи по скорости.

2 Составить структурную схему двухмассовой ЭМС с контуром регулирования скорости, получить передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям.

3 Найти соотношения постоянных времени (T_{M1} , $T_{\text{Э}}$), для которых вычислить фактические и оптимальные значения для жесткости механической характеристики двигателя β и величину коэффициента усиления регулятора K_p .

4 Произвести расчет переходных процессов в пакете MathCAD, определив корни характеристического полинома передаточных функций, рассчитать показатели качества системы – степень устойчивости η , время регулирования t_p , колебательность μ и перерегулирование σ для случая настройки системы по исходным параметрам и оптимальным.

5 Составить математическую модель в пакете Matlab и исследовать переходные процессы, оценив влияние обратной связи по скорости на **демпфирующее действие электропривода при затухании процессов** в упругой механической подсистеме с учетом оптимальных параметров.

6 Оформить отчет и сделать выводы по результатам исследования.

Данные асинхронных двигателей

Таблица В.1 – Основные технические данные электродвигателей серии 4А с фазным ротором $U_H=220/380$ В; степень защиты IP23

Типоразмер двигателя	P_H	η_H	$\cos\varphi$	I_{PH}	E_{p0}	S_H	S_K	M_K/M_H	R_1	X_1	R_2	X_2	J_D
	кВт	%		А	В	%	%		Ом	Ом	Ом	Ом	кг·м ²
Синхронная частота вращения 1500 об/мин													
4АНК160S4	14,0	86,5	0,85	27	330	5,3	33,0	3,0	0,047	0,081	0,061	0,100	0,1
4АНК160M4	17,0	88,0	0,87	34	315	4,1	32,3	3,5	0,035	0,067	0,047	0,087	0,13
4АНК180S4	22,0	87,0	0,86	43	300	5,2	33,0	3,2	0,033	0,061	0,054	0,089	0,19
4АНК180M4	30,0	88,0	0,81	63	290	4,1	30,4	3,3	0,028	0,055	0,044	0,083	0,23
4АНК200M4	37,0	90,0	0,88	62	360	3,0	23,0	3,0	0,029	0,065	0,035	0,099	0,36
4АНК200L4	45,0	90,0	0,88	75	375	3,5	22,5	3,0	0,029	0,067	0,036	0,100	0,43
4АНК225M4	55,0	89,5	0,87	200	170	3,6	20,2	2,5	0,031	0,084	0,035	0,100	0,61
4АНК250SA4	75,0	90,0	0,88	250	180	4,5	20,5	2,3	0,028	0,091	0,039	0,110	0,89
4АНК250SB4	90,0	91,5	0,87	260	220	4,0	19,0	2,5	0,021	0,075	0,031	0,100	0,89
4АНК250M4	110,0	92,0	0,90	260	250	3,5	18,0	2,5	0,022	0,078	0,031	0,100	0,97
4АНК280S4	132,0	92,0	0,88	330	251	2,9	11,2	2,0	0,028	0,130	0,031	0,140	1,81
4АНК280M4	160,0	92,5	0,88	330	300	2,6	10,7	2,0	0,024	0,120	0,028	0,140	2,11
4АНУ315S4	200,0	93,0	0,89	396	312	2,5	9,8	2,0	0,022	0,140	0,026	0,140	3,21
4АНК315M4	250,0	93,0	0,9	425	360	2,5	8,8	2,0	0,022	0,150	0,025	0,140	3,72
4АНК355S4	315,0	93,5	0,90	460	420	2,2	8,4	2,0	0,020	0,120	0,022	0,150	5,82
4АНК355M4	400,0	94,0	0,90	485	505	2,0	7,7	2,0	0,019	0,120	0,020	0,140	7,09

Продолжение таблицы В.1

Типоразмер двигателя	P_H	η_H	$\cos\varphi$	I_{pH}	E_{p0}	S_H	S_K	M_K/M_H	R_1	X_1	R_2	X_2	J_D
	кВт	%		А	В	%	%		Ом	Ом	Ом	Ом	кг·м ²
Синхронная частота вращения 1000 об/мин													
4АНК180S6	13,0	83,5	0,81	42	205	6,4	36,5	3,0	0,048	0,084	0,079	0,110	0,19
4АНК180M6	17,0	85,0	0,82	32,5	335	5,7	35,5	3,0	0,044	0,087	0,077	0,110	0,24
4АНК200M6	22,0	88,0	0,81	37	380	3,5	24,5	3,0	0,032	0,071	0,043	0,110	0,38
4АНК200L6	30,0	88,5	0,82	46	375	4,0	23,5	3,0	0,032	0,073	0,042	0,120	0,43
4АНК225M6	37,0	89,0	0,86	180	140	4,0	23,0	1,9	0,032	0,070	0,038	0,100	0,7
4АНК250SA6	45,0	89,5	0,86	200	155	4,0	21,5	2,3	0,028	0,069	0,032	0,090	1,1
4АНК250SB6	55,0	91,0	0,88	185	190	3,5	20,0	2,5	0,024	0,060	0,027	0,088	1,1
4АНК250M6	75,0	91,5	0,85	200	250	3,0	19,0	2,5	0,022	0,059	0,025	0,087	1,4
4АНК280S6	90,0	90,0	0,88	277	202	3,6	14,7	1,9	0,033	0,120	0,038	0,140	2,5
4АНК280M6	110,0	91,5	0,87	297	230	3,6	14,0	1,9	0,034	0,130	0,038	0,140	2,9
4АНК315S6	132,0	92,0	0,88	320	257	3,0	14,0	1,9	0,026	0,120	0,029	0,140	4,9
4АНК315M6	160,0	92,5	0,88	352	291	3,0	10,2	1,9	0,024	0,110	0,024	0,130	6,1
4АНК355S6	200,0	93,0	0,89	411	304	2,5	9,5	1,8	0,025	0,130	0,027	0,160	7,8
4АНК355M6	250,0	93,0	0,89	401	380	2,5	8,8	1,8	0,022	0,120	0,025	0,150	9,5
Синхронная частота вращения 750 об/мин													
4АНК180S8	11,0	83,5	0,75	42	205	5,7	35,4	3,0	0,049	0,098	0,074	0,110	0,24
4АНК180M8	14,0	84,5	0,69	45	215	4,9	31,4	3,0	0,047	0,099	0,055	0,092	0,3
4АНК200M8	18,0	86,0	0,76	30	380	4,5	31,5	2,5	0,046	0,097	0,054	0,140	0,49
4АНК200L8	22,0	87,0	0,79	40	330	4,5	28,0	2,5	0,042	0,095	0,066	0,140	0,58
4АНК225M8	30,0	86,5	0,80	165	120	4,1	18,4	1,8	0,043	0,098	0,046	0,150	0,83
4АНК250SA8	37,0	87,5	0,80	190	115	5,5	21,0	2,2	0,044	0,100	0,047	0,130	1,19
4АНК250SB8	45,0	89,0	0,82	190	140	4,0	20,0	2,2	0,036	0,090	0,040	0,130	1,19
4АНК250M8	55,0	89,5	0,83	185	190	3,5	18,0	2,2	0,029	0,076	0,031	0,110	1,4
4АНК280S8	75,0	90,5	0,84	257	190	4,0	14,0	1,9	0,031	0,140	0,040	0,150	3,4

Приложение Д – Обозначения и единицы основных величин

Таблица Д.1 – Обозначения и единицы основных величин

Наименование	Обозначение	Единица
Электропривод		
Энергия (работа)	A	Дж
Мощность	P	Вт
Напряжение (ЭДС)	$U (E)$	В
Ток	I	А
Магнитный поток	Φ	Вб
Потокосцепление	Ψ	Вб
Сопротивление активное	R	Ом
Сопротивление реактивное	χ	Ом
Индуктивность	L	Гн
Постоянная времени	T	С
Частота колебаний	Ω	1 / с
Диапазон регулирования	D	-
Логарифмический декремент	λ	-
Теплоёмкость	C	Дж / °С
Теплоотдача	A	Вт / °С
Частота включений	h	-
Поступательное движение		
Путь	S	м
Скорость	v	м / с
Ускорение	a	м / с ²
Масса	m	кг
Радиус приведения	ρ	м
Сила (тяжести)	$F (G)$	Н
Вращательное движение		
Путь	φ	рад
Скорость	ω	1 / с
Ускорение	ε	1 / с ²
Момент	M	Н · м
Момент инерции	J	кг · м ²
Жесткость упругой механической связи	c	Н · м
Передаточное число редуктора	i	-
Жесткость механической характеристики	β	Н · м · с