

## **1. Общие положения**

Контрольная работа предназначена для более глубокого усвоения теоретического материала курса, развития практических навыков расчетов элементов систем электроснабжения и режимов их работы.

Контрольная работа содержит две задачи. Плановая трудоемкость контрольной работы 8 часов, без учета времени изучения и повторения теоретического материала.

Первая задача предполагает нахождение области устойчивости системы регулирования частоты и построение переходного процесса при единичном ступенчатом воздействии.

Теоретическая часть первой задачи рассматривается в теме N2 программы курса, поэтому перед выполнением работы необходимо изучить тему «Регулирование частоты тока синхронных генераторов» (Литература [1] с.11...43). Необходимо также повторить раздел построения переходных процессов дисциплины «Моделирование систем и процессов».

Во второй задаче необходимо выбрать сечения проводов для заданной структуры системы распределения по критерию минимальной массы и заданной допустимой потери напряжения. Выполнение этой задачи рекомендуется после освоения темы 6. Необходимо также повторить раздел «расчеты электрических сетей» дисциплины «Системы электроснабжения воздушных судов». Теоретические сведения по второй задаче изложены в [Л1] с.208-213.

Контрольную работу следует выполнять в специальной тетради. В ней необходимо привести условия задачи для заданного варианта и подробные пояснения к ходу решения задачи. Если используются готовые формулы, необходимо указать литературу, из которой они взяты, пояснить, какие величины подставляются в формулу, в каких единицах берется величина и получается конечный результат. Все схемы должны быть выполнены в соответствии с правилами и условными обозначениями, рекомендуемыми ГОСТами и ЕСКД. На графиках необходимо указывать величину масштабов по осям координат, причем масштаб должен быть выбран таким, чтобы легко можно было найти значения промежуточных точек. Все вычисления должны производиться в системе СИ с необходимой степенью точности в каждом конкретном случае.

## **2. Выбор варианта**

Номера вариантов студент устанавливает по шифру зачетной книжки. Последняя цифра указывает номер варианта всех задач, причем цифре 0 соответствует вариант №10

### 3. Задания контрольной работы

#### Задача 1.

Система стабилизации частоты канала генерирования самолета Ту154 включает в свой состав: привод постоянной частоты ППО40 с встроенным регулятором частоты, корректор частоты, синхронный генератор ГТ40ПЧ6.

Параметры системы стабилизации частоты в зависимости от варианта приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры системы	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Коэффициент самовыравнивания агрегата, $S_m$	1,0	0,5	1,5	1,2	2,5	2,0	3,0	2,7	3,8	3,5
2. Постоянная времени привода, $T_m, c$	1,5	1,5	1	1	1	2	2	2	2	2
3. Постоянная времени регулятора по грубому каналу, $T\sigma, c$	0,3	0,5	0,8	0,3	0,5	0,9	0,3	0,5	0,8	0,5
4. Коэффициент усиления по параметру управления, $N$	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	0,9	1,1	1,0	0,9	0,9
5. Коэффициент передачи сигнала от корректора, $K_\xi$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,1
6. Коэффициент, характеризующий эффективность влияния корректора на перемещение золотника, $K\omega$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
7. коэффициент, характеризующий влияние возмущающего воздействия, $\lambda$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

По заданным параметрам выполнить:

а) построить границу области устойчивости системы регулирования частоты одиночно работающего агрегата ППО40 в координатах:  $Y$  -

коэффициент усиления центробежно-гидравлического регулятора частоты ( $K_v$ ),  $X$  - постоянная времени корректора частоты ( $T_\xi$ );

б) в области устойчивости выбрать произвольную точку и построить переходный процесс при единичном ступенчатом воздействии;

в) построить структурную схему системы регулирования частоты.

### Задача 2.

Рассчитать электрическую сеть постоянного тока напряжением 28,5В, схема которой изображена на рис.1.

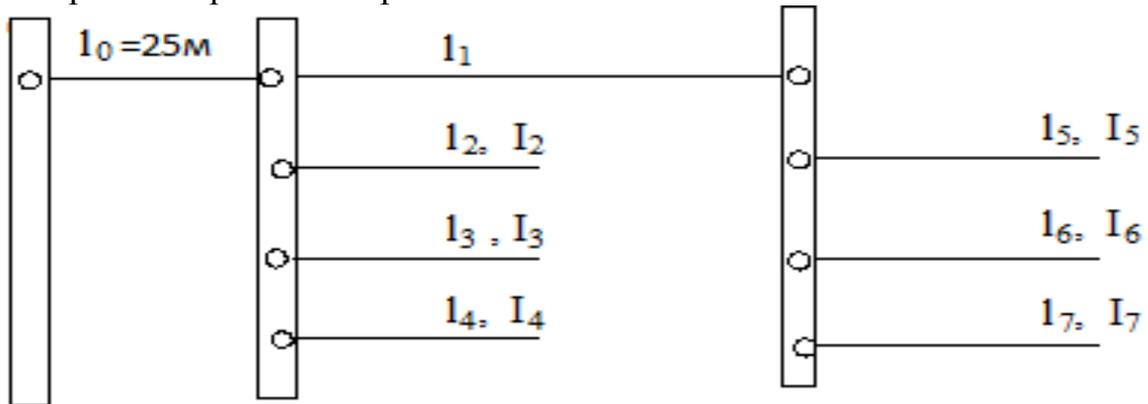


Рис.1

Данные для расчета приведены в табл.2. Допустимая потеря напряжения для концов всех участков сети равна 2В.

Расчет выполнить по критерию минимальной массы проводникового материала. Материал проводов медь.

Таблица 2.

Номер варианта	Длины участков (м)							Токи нагрузки (А)						
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	I2	I3	I4	I5	I6	I7	
1	18	14	10	8	5	0	0	25	25	10	10	0	0	
2	10	14	18	0	22	5	0	15	20	0	20	25	0	
3	16	12	0	0	16	20	18	15	0	0	20	20	5	
4	14	0	10	20	0	5	25	0	5	30	0	30	40	
5	22	0	0	20	16	20	25	0	0	5	40	15	25	
6	10	0	20	0	18	14	30	0	40	0	10	30	25	
7	18	14	20	25	0	10	0	10	5	25	0	40	0	
8	20	14	10	10	0	0	15	10	15	20	0	0	25	
9	10	0	20	20	16	0	18	0	15	10	10	0	25	
10	14	18	0	8	5	5	0	15	0	10	25	25	0	

#### 4. Методические указания к контрольным заданиям

При решении задачи №1 следует воспользоваться уравнениями привода, центробежно-гидравлического регулятора частоты вращения и корректора частоты, приведенными в Л[1] с.40-42. Обозначения параметров табл.1 соответствуют этим уравнениям.

Для построения границы области устойчивости в координатах  $K_v$ ,  $T\xi$  необходимо неравенство 2.33 (Л[1]) заменить на равенство и, задаваясь значениями  $T\xi$ , построить зависимость  $K_v=f(T\xi)$ . Построенная кривая разбивает плоскость на две области: устойчивую и неустойчивую. Для того чтобы определить устойчивую область нужно выбрать любую точку на плоскости и по её координатам проверить выполнение неравенства 2.33.

Для построения переходного процесса можно воспользоваться любым из известных вам методов из теории автоматического управления, в частности, частотным методом построения переходных процессов с помощью трапецидальных характеристик. Упомянутый метод описывается в Л[2] на с.422...425, где также приводится пример построения переходного процесса при единичном ступенчатом воздействии.

Для построения переходного процесса необходимо, исходя из структурной схемы системы регулирования, записать передаточную функцию замкнутой системы  $W(P)$ , затем произвести замену оператора  $p$  на  $j\omega$ . Полученное выражение преобразовать к виду  $W(j\omega)=P(\omega) + jQ(\omega)$ .

Задаваясь  $\omega$ , построить вещественную частотную характеристику  $P(\omega)$ . Полученную характеристику аппроксимировать набором трапеций таким образом, чтобы площадь трапеций с учетом их знака была равна площади ограниченной кривой  $P(\omega)$ .

По полученным характеристикам трапеций построить значения  $h$  функций и результирующий переходный процесс.

Можно также для построения переходного процесса воспользоваться моделирующими программами MathCAD или MatLab .

Для решения задачи №2 необходимо провести расчет электрической сети из условия минимальной массы проводникового материала в соответствии с рекомендациями, приведенными в [Л.1] с 244-249 .

При расчете электрической сети необходимо вначале составить уравнение для объема проводникового материала всех участников сети ( $V$ ). Объем проводникового для участка длиной  $L$  равен  $IL^2/\gamma\Delta U$  , где  $I$  - ток, протекающий через проводник;  $\gamma=57\text{м/Оммм}^2$  - удельная проводимость меди;  $\Delta U$  - падение напряжения на данном участке. Падение напряжения  $\Delta U$  связано с сечением проводника  $S$  соотношением  $S=IL/\gamma\Delta U$ .

Условие минимума массы сети можно найти, решив совместно систему уравнений:

$$\begin{cases} dV/d\Delta U_0=0; \\ \dots\dots\dots \\ dV/d\Delta U_i=0, \quad \Delta U_i\text{- падение напряжения на } i\text{-м участке ( } i=0,1,\dots,n). \end{cases}$$

## 5.Примеры решения задач

### Задача № 1

Исходные уравнения системы регулирования частоты согласно [Л.1, с. 40] имеют вид:

$$\begin{cases} (T_M \cdot p + S_M) \cdot v = N \cdot \sigma + \rho + \lambda \cdot v_{A.Д} \\ (T_\sigma \cdot p + 1) \cdot \sigma = -k_v \cdot v - k_\xi \cdot \xi \\ T_\xi \cdot p \cdot \xi = k_\omega \cdot v \end{cases} \quad (1)$$

Данные уравнения записаны с учетом того, что процессы регулирования частоты протекают намного медленнее процессов регулирования напряжения (т.е. можно считать, что относительное изменение напряжения в системе отсутствует ( $u=0$ )).

По уравнениям (1) строится структурная схема системы регулирования (Рис.2).

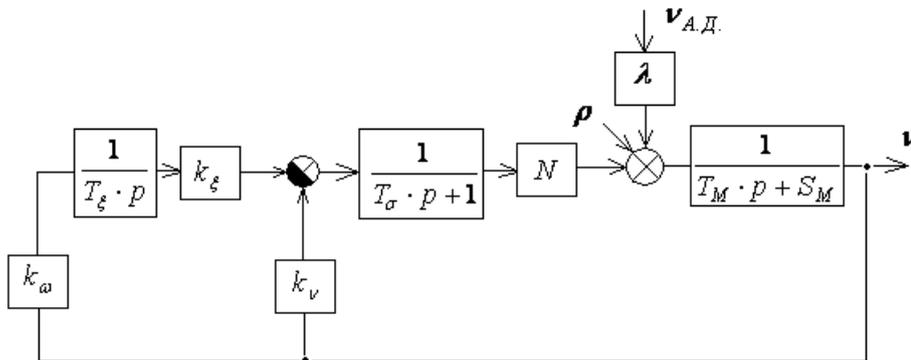


Рис.2

В структурной схеме обозначено:

$k_\omega$  - коэффициент усиления, характеризующий эффективность влияния точного канала регулирования на перемещение золотника;

$\frac{1}{T_\xi \cdot p}$  - передаточная функция корректора частоты;

$k_\xi$  - коэффициент передачи сигнала от корректора;

$k_v$  - коэффициент усиления грубого канала регулирования частоты;

$\frac{1}{T_\sigma \cdot p + 1}$  - передаточная функция грубого канала регулирования;

$N$  - коэффициент усиления привода по параметру управления;

$\rho$  - относительное изменение активного сопротивления нагрузки генератора;

$\lambda$  - коэффициент, характеризующий влияние возмущающего воздействия (скорости авиадвигателя);

$\frac{1}{T_M \cdot p + S_M}$  - передаточная функция привода постоянной частоты вращения;

$\nu$  - относительное изменение угловой скорости выходного вала привода;

$\nu_{А.Д.}$  - относительное изменение возмущающего воздействия – угловой скорости авиационного двигателя.

Исключив из системы уравнений (1)  $\sigma$  и  $\xi$ , получим уравнение стабилизации угловой скорости:

$$\begin{aligned} & [T_M \cdot T_\sigma \cdot T_\xi \cdot \rho^3 + T_\xi \cdot (T_\sigma \cdot S_M + T_M) \cdot \rho^2 + T_\xi \cdot (N \cdot k_\nu + S_M) \cdot \rho + N \cdot k_\xi \cdot k_\omega] \cdot \nu = \\ & = T_\xi \cdot \rho \cdot (T_\sigma \cdot \rho + 1) \cdot (\rho + \lambda \cdot \nu_{ад}) \end{aligned} \quad (2)$$

Характеристическое уравнение системы имеет вид:

$$T_M \cdot T_\sigma \cdot T_\xi \cdot \rho^3 + T_\xi \cdot (T_\sigma \cdot S_M + T_M) \cdot \rho^2 + T_\xi \cdot (N \cdot k_\nu + S_M) \cdot \rho + N \cdot k_\xi \cdot k_\omega = 0 \quad (3)$$

Представим это уравнение в виде:

$$\lambda_3 \cdot p^3 + \lambda_2 \cdot p^2 + \lambda_1 \cdot p + \lambda_0 = 0$$

Для системы третьего порядка необходимыми условиями устойчивости являются;

а) требования положительности всех коэффициентов характеристического уравнения;

$\lambda_3 > 0, \lambda_2 > 0, \lambda_1 > 0, \lambda_0 > 0$  для уравнения 3, все параметры, кроме  $T_\xi$  и  $k_\nu$  заданы и положительны, значит условие «а» выполняется при положительности  $T_\xi$  и  $k_\nu$

б) выполнения неравенства;  $\lambda_2 \cdot \lambda_1 > \lambda_3 \cdot \lambda_0$

$$T_\xi^2 \cdot (S_M \cdot T_\sigma + T_M) \cdot (S_M + N \cdot k_\nu) > T_M \cdot T_\sigma \cdot T_\xi \cdot N \cdot k_\omega \cdot k_\xi \quad (4)$$

Построим область устойчивости в координатах  $K_\nu$  и  $T_\xi$ . Из неравенства 4 можно найти зависимость  $k_\nu = f(T_\xi)$  и определить область устойчивости

$$S_M + N \cdot k_\nu > \frac{T_M \cdot T_\sigma \cdot N \cdot k_\omega \cdot k_\xi}{T_\xi \cdot (S_M \cdot T_\sigma + T_M)} \quad ; \quad k_\nu > \frac{T_M \cdot T_\sigma \cdot k_\omega \cdot k_\xi}{T_\xi \cdot (S_M \cdot T_\sigma + T_M)} - \frac{S_M}{N} \quad (5)$$

Уравнение границы устойчивости

$$k_\nu = \frac{T_M \cdot T_\sigma \cdot k_\omega \cdot k_\xi}{T_\xi \cdot (S_M \cdot T_\sigma + T_M)} - \frac{S_M}{N} \quad (6)$$

Подставим численные значения параметров ( $S_M=2$ ,  $T_M=2$ ,  $T_\sigma=0.8$ ,  $N=0.9$ ,  $K_\xi=1$ ,  $K_\omega=1$ ) в (6) и, задаваясь  $T_\xi$ , определим  $K_v$ . Построим зависимость  $k_v=f(T_\xi)$ , примерный вид зависимости показан на рис.3.

$$k_v(T_\xi) := \frac{0.444}{T_\xi} - 2.222$$

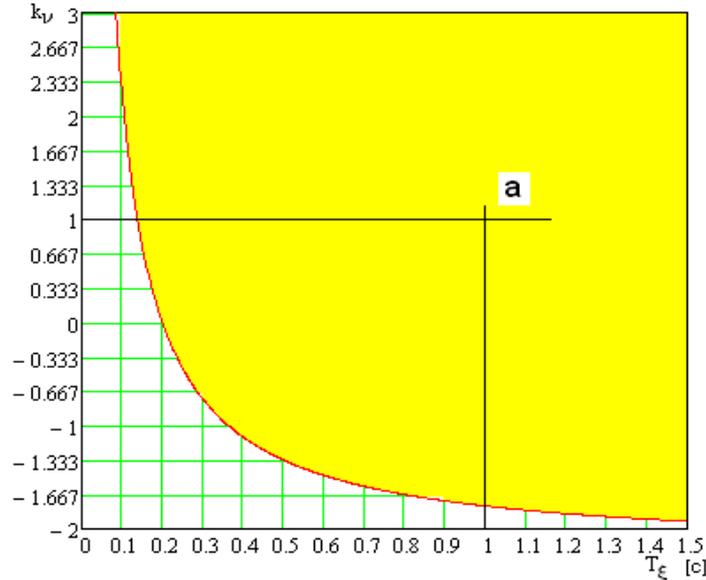


Рис.3

Зависимость  $k_v=f(T_\xi)$  разбивает плоскость на две области: устойчивую и неустойчивую. Для того, чтобы определить область устойчивости выбираем произвольно точку «а» в одной из областей и, если для этой точки выполняется неравенство (5), то эта область является устойчивой. Пусть выбранная точка «а» с параметрами  $k_v$ ,  $T_\xi$  принадлежит к области устойчивости (на рис.3 эта область закрашена сплошным фоном). Построим переходный процесс для выбранной точки «а» для единичного возмущающего воздействия.

Из уравнения (2) находим передаточную функцию замкнутой системы по возмущению:

$$\Phi(p) = \frac{v(p)}{(\rho + \lambda \cdot v_{ad})} = \frac{T_\xi \cdot p \cdot (T_\sigma \cdot p + 1)}{T_M \cdot T_\sigma \cdot T_\xi \cdot p^3 + T_\xi \cdot (T_\sigma \cdot S_M + T_M) \cdot p^2 + T_\xi \cdot (N \cdot k_v + S_M) \cdot p + N \cdot k_\xi \cdot k_\omega}$$

Для построения переходного процесса допустим, что в системе отсутствует возмущение по «р» (т.е.  $\rho=0$ ). Найдем переходный процесс по возмущению скорости АД. Для этого случая

$$\Phi(p) = \frac{v(p)}{(v_{ad})} = \frac{\lambda \cdot T_\xi \cdot p \cdot (T_\sigma \cdot p + 1)}{T_M \cdot T_\sigma \cdot T_\xi \cdot p^3 + T_\xi \cdot (T_\sigma \cdot S_M + T_M) \cdot p^2 + T_\xi \cdot (N \cdot k_v + S_M) \cdot p + N \cdot k_\xi \cdot k_\omega} \quad (7)$$

Подставив численные значения параметров (числа даны для примера) получим:

$$\Phi(p) = \frac{0.8p^2 + p}{1.6p^3 + 3.6p^2 + 2.9p + 0.9} \quad (8)$$

Для построения переходного процесса воспользуемся пакетом

расширения Control System Toolbox MatLab.

Для построения переходного процесса в MatLab необходимо взять передаточную замкнутую функцию по возмущению и использовать стандартный оператор следующего вида:

`>> W=tf([0.8 1 0],[1.6 3.6 2.9 0.9])` , где  $0.8 \ 1 \ 0$  ;  $1.6 \ 3.6 \ 2.9 \ 0.9$  коэффициенты полиномов соответственно числителя и знаменателя передаточной функции замкнутой системы (8). В результате MatLab преобразует исходный полином (8) в переходную функцию

*Transfer function:*

$$0.8 s^2 + s$$

---


$$1.6 s^3 + 3.6 s^2 + 2.9 s + 0.9$$

Для построения графика переходного процесса при единичном возмущении служит команда `step`.

`>> ltiview ('step',W).`

Вид графика переходного процесса для полинома (8) показан на рис.4

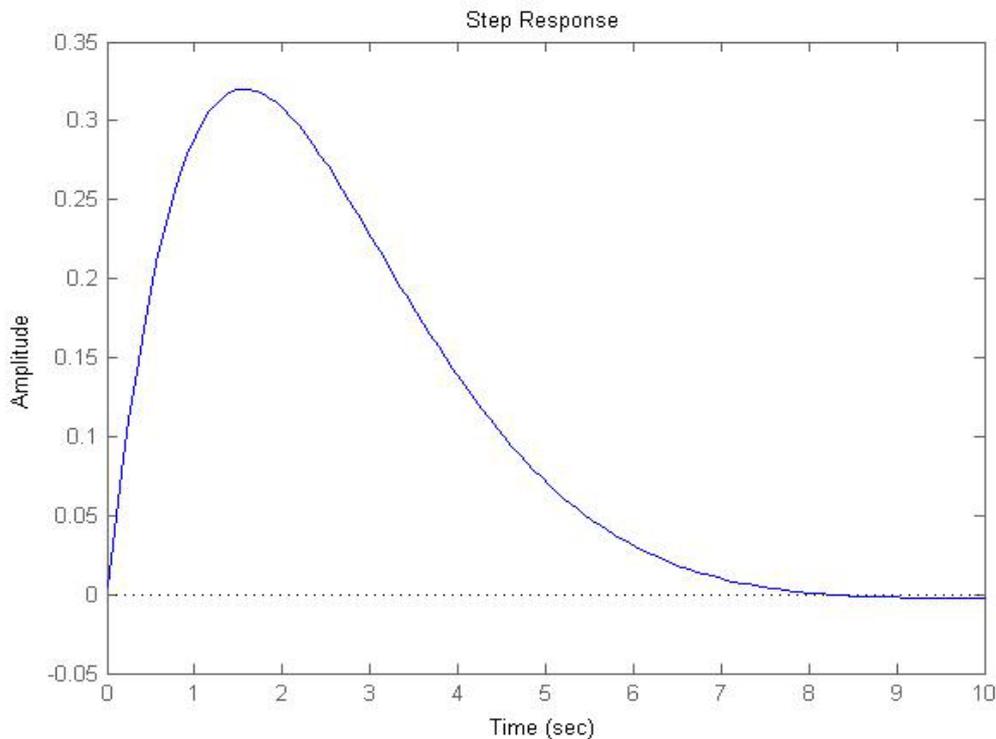


Рис.4

## Задача № 2.

Объем проводящего материала всех участков сети равен

$$V = S_0 l_0 + S_1 l_1 + S_2 l_2 + S_3 l_3 + S_4 l_4 + S_5 l_5 + S_6 l_6 + S_7 l_7,$$

где  $S_i$  – сечения участков линий.

Заданная потеря напряжения разделяется на две части:

$$\Delta U_{\text{дон}} = \Delta U_0 + \Delta U_{\text{омс}},$$

где  $\Delta U_0$  – потеря напряжения на участке  $l_0$ ;

$\Delta U_{\text{омс}}$  – потеря напряжения в ответвлениях на участках  $l_2$ ;  $l_3$ ;  $l_4$  и  $(l_1 + l_5)$ ;  $(l_1 + l_6)$ ;  $(l_1 + l_7)$ .

При этом предполагается, что потери напряжения для всех потребителей одинаковы:

$$\Delta U_{\text{омс}} = \Delta U_2 = \Delta U_3 = \Delta U_4 = (\Delta U_1 + \Delta U_5) = (\Delta U_1 + \Delta U_6) = (\Delta U_1 + \Delta U_7).$$

Сечение провода на участке  $l_0$  равно

$$S_0 = \frac{(I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7) \cdot l_0}{\gamma \cdot \Delta U_0},$$

где  $\gamma = 57$  [м/Ом\*мм<sup>2</sup>] – удельная проводимость меди.

Сечения проводов на других участках сети будут равны:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{I_1 l_1}{\gamma(\Delta U_{\text{омс}} - \Delta U_5)} = \frac{I_1 l_1}{\gamma \Delta U_1} = \frac{(I_5 + I_6 + I_7) l_1}{\gamma \Delta U_1}; \\ S_2 &= \frac{I_2 l_2}{\gamma \Delta U_2} = \frac{I_2 l_2}{\gamma \Delta U_{\text{омс}}} = \frac{I_2 l_2}{\gamma(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0)}; \\ S_3 &= \frac{I_3 l_3}{\gamma \Delta U_3} = \frac{I_3 l_3}{\gamma \Delta U_{\text{омс}}} = \frac{I_3 l_3}{\gamma(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0)}; \\ S_4 &= \frac{I_4 l_4}{\gamma \Delta U_4} = \frac{I_4 l_4}{\gamma \Delta U_{\text{омс}}} = \frac{I_4 l_4}{\gamma(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0)}; \\ S_5 &= \frac{I_5 l_5}{\gamma \Delta U_5} = \frac{I_5 l_5}{\gamma(\Delta U_{\text{омс}} - \Delta U_1)} = \frac{I_5 l_5}{\gamma(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)}; \\ S_6 &= \frac{I_6 l_6}{\gamma \Delta U_6} = \frac{I_6 l_6}{\gamma(\Delta U_{\text{омс}} - \Delta U_1)} = \frac{I_6 l_6}{\gamma(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)}; \\ S_7 &= \frac{I_7 l_7}{\gamma \Delta U_7} = \frac{I_7 l_7}{\gamma(\Delta U_{\text{омс}} - \Delta U_1)} = \frac{I_7 l_7}{\gamma(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)}. \end{aligned} \tag{9}$$

Объем проводящего материала всех проводов будет составлять

$$V = \frac{1}{\gamma} \left( \frac{(I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7) \cdot l_0^2}{\Delta U_0} + \frac{(I_5 + I_6 + I_7) l_1^2}{\Delta U_1} + \frac{I_2 l_2^2 + I_3 l_3^2 + I_4 l_4^2}{(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0)} + \frac{I_5 l_5^2 + I_6 l_6^2 + I_7 l_7^2}{(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)} \right).$$

Условие минимума массы сети запишется в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial U_0} = -\frac{(I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7) \cdot l_0^2}{\Delta U_0^2} + \frac{I_2 l_2^2 + I_3 l_3^2 + I_4 l_4^2}{(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0)^2} + \frac{I_5 l_5^2 + I_6 l_6^2 + I_7 l_7^2}{(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)^2} = 0; \\ \frac{\partial V}{\partial U_1} = -\frac{(I_5 + I_6 + I_7) \cdot l_1^2}{\Delta U_1^2} + \frac{I_5 l_5^2 + I_6 l_6^2 + I_7 l_7^2}{(\Delta U_{\text{дон}} - \Delta U_0 - \Delta U_1)^2} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Решая совместно систему уравнений 10, находим  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_0$ .

Подставим полученные значения  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_0$  в уравнения (9) и определим расчетные значения сечений  $S_0$ - $S_7$ .

Для исходных значений, указанных в таблице 3, расчетные значения сечений приведены в таблице 4.

Таблица 3

Длины участков (м)							Токи нагрузки (А)					
$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$	$l_7$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$
22	14	10	10	0	0	15	10	15	20	0	0	25

Из таблицы 5 выбираем ближайшее большее сечение из стандартного ряда сечений авиационных проводов для каждого участка сети.

Таблица 4

Расчетные сечения	Стандартные
$S_0(\text{мм}^2)$	29.97
$S_1(\text{мм}^2)$	16.6
$S_2(\text{мм}^2)$	2.54
$S_3(\text{мм}^2)$	2.68
$S_4(\text{мм}^2)$	3.61
$S_5(\text{мм}^2)$	0
$S_6(\text{мм}^2)$	0
$S_7(\text{мм}^2)$	33.1

Таблица 5

Стандартные сечения, $\text{мм}^2$
0.5
0.75
1.0
1.5
2
2.5
4
6
10
16
25
35
50

## 6. Литература

1. Синдеев И.М. Савелов А.А. Системы электроснабжения воздушных судов. М.: Транспорт, 1990г.

2. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. М.: Машиностроение, 1978.

## Содержание

1. Общие положения.....	3
2. Выбор варианта.....	3
3. Задания контрольной работы.....	4
4. Методические указания к контрольным заданиям.....	6
5. Примеры решения задач.....	7
6. Литература.....	13