

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Саратовский государственный технический университет  
Балаковский институт техники, технологии и управления

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ  
(ДЛИННЫЕ ЛИНИИ)

Методические указания к выполнению контрольных и практических работ  
по курсу “Теоретические основы электротехники ” для студентов  
направления 140400.62 “Электроэнергетика ” всех форм обучения

*Одобрено*  
*редакционно-издательским советом*  
*Балаковского института техники,*  
*технологии и управления*

Балаково 2014

## **ВВЕДЕНИЕ**

Методические указания по курсу «Теоретические основы электротехники» предназначены для студентов-заочников направления 140400.62 «ЭЛЭТ». Указания включают задания к контрольной работе по курсу «Теоретические основы электротехники», краткие теоретические сведения, необходимые для выполнения работы и пример ее выполнения. В рамках контрольной работы проводится изучение параметров линий с распределенными параметрами и расчет токов и напряжений вдоль линии при синусоидальном входном воздействии. Содержание заданий контрольной работы соответствует образовательному стандарту и рабочим программам.

Методические указания могут быть использованы студентами очной формы обучения при выполнении заданий на практических занятиях, при выполнении самостоятельных и расчетно-графических работ по курсу ТОЭ.

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ, ОФОРМЛЕНИЮ И СДАЧЕ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ**

Методические указания содержат 50 вариантов заданий. Номер задания выбирается по двум последним цифрам номера зачетной книжки. Если две последние цифры более 50, то для определения номера необходимо вычесть 50. (Для студентов очников номер варианта определяется по номеру в учебном журнале). Работы, выполненные не по своему варианту, не засчитываются.

К выполнению контрольной работы можно приступать только после изучения теоретического материала по рекомендованной литературе и внимательного изучения методических указаний.

Методические указания содержат пример расчета линии с распределенными параметрами, который определяет общий алгоритм

расчета для всех вариантов.

## **СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

В рамках контрольной работы определяются первичные параметры линий  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$ ,  $G_0$ ; рассчитывается напряжение  $\underline{U}_1$ , ток  $\underline{I}_1$  в начале линии, активная  $P$  и полная  $S$  мощности в начале и конце линии, а также КПД линии; для линии без потерь с активной нагрузкой на конце линии определяется напряжение  $\underline{U}_1$ , ток  $\underline{I}_1$  в начале линии, а также длина электромагнитной волны  $\lambda$ .

Объем контрольной работы должен соответствовать объему примера расчета, приведенного в методических указаниях.

## **ОФОРМЛЕНИЕ И СДАЧА КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

К оформлению и сдаче контрольной работы предъявляются следующие требования:

1. Перед решением задачи написать условие задачи.
2. Основные положения решения должны быть достаточно подробно объяснены.
3. Решение задачи представлять вместе со всеми промежуточными преобразованиями. Необходимо руководствоваться образцами решения задачи, помещенной в методических указаниях.
4. График должен быть выполнен аккуратно.
5. При решении задачи необходимо анализировать единицы измерения всех величин, входящих в формулу и проверять, в каких единицах измерений должен быть получен результат.
6. Писать контрольную работу четким почерком, чернилами. Допускается компьютерное выполнение контрольной работы.
7. Контрольные задания должны быть датированы и подписаны студентом.

8. Оформленная работа в установленные сроки сдается в деканат.

### ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНЫМ РАБОТАМ

По заданным в таблице 1 характеристикам двухпроводной линии, выполненной из медного провода, частоте  $f$ , длине линии  $l$ , комплексным значениям напряжения  $\underline{U}_2$ , тока  $\underline{I}_2$  в конце линии, сопротивлению нагрузки  $Z_H$  требуется:

1. Определить первичные параметры линий  $R_0, L_0, C_0, G_0$ .
2. Рассчитать напряжение  $\underline{U}_1$ , ток  $\underline{I}_1$  в начале линии, активную  $P$  и полную  $S$  мощности в начале и конце линии, а также КПД линии.
3. Полагая, что линия п. 2 стала линией без потерь ( $R_0 = 0, G_0 = 0$ ), а нагрузка на конце линии стала активной и равной по модулю комплексной нагрузке п. 2, определить напряжение  $\underline{U}_1$ , ток  $\underline{I}_1$  в начале линии, а также длину электромагнитной волны  $\lambda$ .
4. Для линии без потерь п. 3 построить график распределения действующего значения напряжения вдоль линии в функции координаты  $y$ .

Примечание:

1. Для воздушных линий (ВЛ) задается расстояние  $a$  между осями проводов и радиус  $r$  проводов.
2. Для кабельных линий (КЛ) задается расстояние  $a$  между осями жил кабелей и диаметр  $d$  жилы кабеля.
3. Для коаксиальных кабелей (КК) задается диаметр  $d$  внутреннего проводника и внутренний диаметр  $D$  внешнего проводника.
4. Эквивалентную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon$  изоляции кабельных и коаксиальных кабелей принять  $\varepsilon = 1.2$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-4}$ .

Таблица 1

## Варианты задания

Вариант	$f$ , кГц	$l$ , км	$a$ , мм	$r$ , мм	$d$ , мм	$D$ , мм	$\underline{U}_2$ , В	$\underline{I}_2$ , мА	$Z_H$ , Ом	Вид линии
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	12	15	2	-	-	10	-	400	ВЛ
2	4	6	15	1	-	-	10	$2 e^{j20}$	-	ВЛ
3	6	15	15	0,5	-	-	20	$2 e^{j10}$	-	ВЛ
4	1	10	15	0,4	-	-	20	-	$500 e^{-j30}$	ВЛ
5	20	8	20	2	-	-	20	$4 e^{j30}$	-	ВЛ
6	40	5	20	1,5	-	-	-	$5 e^{j15}$	$300 e^{-j30}$	ВЛ
7	60	4	20	1	-	-	55	-	$1000 e^{-j10}$	ВЛ
8	20	3	20	0,5	-	-	-	$10 e^{j15}$	$2000 e^{-j5}$	ВЛ
9	40	2	20	0,4	-	-	40	-	$4000 e^{-j10}$	ВЛ
10	60	1	20	0,3	-	-	30	-	$2000 e^{-j16}$	ВЛ
11	10	10	50	2	-	-	50	$4 e^{j10}$	-	ВЛ
12	10	6	50	1,5	-	-	80	$30 e^{j20}$	-	ВЛ
13	10	6	50	1	-	-	20	$20 e^{j16}$	-	ВЛ
14	10	4	50	0,7	-	-	30	-	$1250 e^{-j16}$	ВЛ
15	10	0,5	50	0,5	-	-	40	$10 e^{j20}$	-	ВЛ
16	10	1	50	0,4	-	-	50	-	$1400 e^{-j7}$	ВЛ
17	10	2	40	0,3	-	-	50	-	$2500 e^{-j14}$	ВЛ
18	10	5	40	2	-	-	87	-	$1620 e^{-j12}$	ВЛ
19	10	8	40	1,5	-	-	-	$12 e^{j8}$	$1800 e^{-j8}$	ВЛ
20	10	10	40	1	-	-	60	-	667	ВЛ
21	50	0,4	30	0,6	-	-	100	-	$3100 e^{-j15}$	ВЛ
22	50	0,3	30	0,5	-	-	60	$20 e^{j10}$	-	ВЛ
23	50	0,2	30	0,4	-	-	20	-	$287 e^{-j8}$	ВЛ
24	50	0,1	30	0,3	-	-	10	$5 e^{j10}$	-	ВЛ
25	50	0,6	30	2	-	-	80	-	$500 e^{-j10}$	ВЛ
26	50	0,4	80	1,5	-	-	60	$25 e^{j12}$	-	ВЛ

## Окончание таблицы1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
27	50	0,2	80	1,2	-	-	70	-	$800 e^{-j15}$	ВЛ
28	100	0,5	80	1	-	-	50	$10 e^{j20}$	-	ВЛ
29	100	0,3	80	0,8	-	-	40	-	$1100 e^{-j6}$	ВЛ
30	100	0,1	80	0,5	-	-	20	$5 e^{j16}$	-	ВЛ
31	1	20	10	2	-	-	-	$30 e^{j10}$	$1000 e^{-j10}$	КЛ
32	5	10	10	1,5	-	-	-	$20 e^{j5}$	$1200 e^{-j5}$	КЛ
33	10	1	10	1,2	-	-	-	$15 e^{j16}$	$1500 e^{-j16}$	КЛ
34	20	0,6	10	1	-	-	12	-	$500 e^{-j6}$	КЛ
35	50	0,4	10	0,8	-	-	25	-	$1200 e^{-j7}$	КЛ
36	100	0,2	10	0,6	-	-	-	$4 e^{j8}$	$1400 e^{-j8}$	КЛ
37	1	10	10	0,4	-	-	-	$8 e^{j20}$	$1600 e^{-j20}$	КЛ
38	5	1	20	2	-	-	100	$20 e^{j9}$	-	КЛ
39	10	0,5	20	1,5	-	-	60	$15 e^{j8}$	-	КЛ
40	20	0,2	20	1,2	-	-	-	$12 e^{j16}$	$2000 e^{-j16}$	КЛ
41	50	0,1	20	1	-	-	80	$25 e^{j12}$	-	КЛ
42	100	0,05	20	0,8	-	-	80	-	$4000 e^{-j12}$	КЛ
43	1	10	20	0,6	-	-	-	$20 e^{j14}$	$2000 e^{-j14}$	КЛ
44	2	2	20	0,5	-	-	50	$12 e^{j7}$	-	КЛ
45	5	1	-	-	0,3	8	4	-	75	КК
46	100	0,01	-	-	0,4	10	10	-	$100 e^{j10}$	КК
47	100	0,08	-	-	0,5	12	20	-	$125 e^{j20}$	КК
48	50	0,06	-	-	0,6	14	30	$2 e^{j5}$	-	КК
49	50	0,04	-	-	0,7	16	60	$4 e^{j15}$	-	КК
50	100	0,02	-	-	0,8	18	80	-	$200 e^{j30}$	КК

## КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

**Ц е л ь р а б о т ы** - изучение параметров линий с распределенными параметрами, расчет токов и напряжений вдоль линии при синусоидальном входном воздействии.

### Первичные параметры длинных линий

Электрические линии с распределенными параметрами – линии, в которых для одного и того же момента времени ток и напряжение непрерывно изменяются при переходе от одной точки (сечения) линии к соседней точке, т.е. являются функциями времени и пространственной координаты.

К первичным параметрам однородной линии на единицу длины относятся:

$R_0$  - активное сопротивление [Ом/км];

$L_0$  - индуктивность [Гн/км];

$C_0$  - емкость [Ф/км];

$G_0$  - проводимость изоляции между проводами [См/км].

1. Первичные параметры воздушной двухпроводной линии определяются по нижеприведенным формулам:

Сопротивление проводов двухпроводной линии на постоянном токе

$$r_0 = \rho \frac{8000}{\pi d^2} = \rho \frac{2550}{d^2} [\text{Ом/км}], \quad (1)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление проводов при температуре  $20^\circ$  (для меди  $\rho = 0,01785 \text{ Ом мм}^2/\text{м}$ );

$d$  - диаметр проводника, мм.

Активное сопротивление единицы длины линии на переменном токе

$$R_0 = r_0 [1 + F(x)]. \quad (2)$$

Поправочный коэффициент  $F(x)$  учитывает увеличение активного сопротивления линии за счет поверхностного эффекта. Он является функцией  $x$ , определяемой по формуле

$$x = 7,09 \sqrt{\frac{f\mu}{10^4 r}}, \quad (3)$$

где  $f$  – частота, Гц;

$\mu$  – магнитная проницаемость (для медных проводов  $\mu = 1$ , для стальных проводов  $\mu = 120$ );

$r$  – радиус проводника.

Коэффициент  $F(x)$  определяется по таблице 2.

Таблица 2

$X$	$F(x)$	$G(x)$	$H(x)$	$Q(x)$
0	0	0	0,0417	1
1	0,0052	0,0152	0,053	0,997
2	0,0782	0,1724	0,169	0,961
3	0,318	0,405	0,348	0,845
4	0,678	0,584	0,466	0,686
5	1,042	0,755	0,53	0,556
6	1,394	0,932	0,575	0,465
8	2,094	1,287	0,634	0,351
10	2,799	1,641	0,75	0,282
Более 10	$\frac{x\sqrt{2}-3}{4}$	$\frac{x\sqrt{2}-1}{8}$	0,75	$\frac{2\sqrt{2}}{x}$

Индуктивность двухпроводной воздушной линии на единицу длины определяется по известному расстоянию между осями проводов  $a$ , радиусу провода  $r$  и коэффициенту  $x$ :

$$L_0 = 4 \ln \left[ \frac{a}{r} + Q(x)\mu \right] 10^{-4} \text{ [Гн/км]}. \quad (4)$$



Емкость двухпроводной воздушной линии на единицу длины можно рассчитать по формуле:

$$C_0 = 1,05 \frac{1}{36 \ln \frac{a}{r}} \cdot 10^{-6} \text{ [Ф/м]}. \quad (5)$$

Коэффициент 1,05 учитывает влияние изоляторов и соседних проводов на емкость линии.

Проводимость изоляции единицы длины линии

$$G_0 = G' + nf, \quad (6)$$

где  $G'$  - проводимость изоляции на постоянном токе, равная  $1 \cdot 10^{-8} \text{ См/км}$  при сухой погоде;

$n$  - коэффициент диэлектрических потерь, равный  $5 \cdot 10^{-11} \text{ См/км} \cdot \text{Гц}$  при сухой погоде.

2. Первичные параметры кабельной линии определяются по нижеприведенным формулам:

активное сопротивление кабельной линии на переменном токе с учетом дополнительных сопротивлений за счет поверхностного эффекта и эффекта близости для частот менее 30 кГц определяется по формуле:

$$R_0 = \left[ 1 + F(x) + \frac{PG(x) \left( \frac{d}{a} \right)^2}{1 - H(x) \left( \frac{d}{a} \right)^2} \right], \quad (7)$$

где  $r_0$  - активное сопротивление единицы длины линии на постоянном токе, определяемое по формуле (1);

$F(x)$ ,  $G(x)$ ,  $H(x)$  - коэффициенты, определяемые по табл. 2;

$P$  - коэффициент, учитывающий тип скрутки кабеля; принять  $P = 5$ .

На частотах выше 30 кГц учитывается дополнительное сопротивление  $\Delta R$ , обусловленное потерями на вихревые токи в соседних проводниках

$$\Delta R = \delta \sqrt{\frac{f}{200000}} \text{ [Ом/км];} \quad (8)$$

тогда

$$R_0 = R'_0 + \Delta R \quad (9)$$

Индуктивность единицы длины кабеля определяется по формуле (4).

Емкость единицы длины кабеля определяется по формуле:

$$C_0 = \frac{\varepsilon}{36 \ln 0,6 \frac{a}{r}} \cdot 10^{-6} \text{ [Ф/км]}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon$  - эквивалентная диэлектрическая проницаемость;

0,6 – коэффициент, учитывающий скрутку кабеля.

Проводимость изоляции единицы длины кабеля

$$G_0 = \omega C_0 \operatorname{tg} \delta, \quad (11)$$

где  $\delta$  - угол диэлектрических потерь.

3. Первичные параметры коаксиального кабеля с медными жилами и оплеткой вычисляются по формулам:

- активное сопротивление единицы длины

$$R_0 = 8,35 \sqrt{f} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \text{ [Ом/км];} \quad (12)$$

- индуктивность единицы длины линии

$$L_0 = 2 \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-4} \text{ [Гн/км];} \quad (13)$$

- емкость единицы длины линии

$$C_0 = \frac{\varepsilon}{18 \ln \frac{D}{d}} \cdot 10^{-6} \text{ [Ф/км]}. \quad (14)$$

Проводимость единицы длины линии вычисляется по формуле (11).

В формулах (12) – (14) диаметр внутреннего проводника  $d$ , диаметр оплетки  $D$  задан в мм, частота  $f$  в Гц.

Напряжение  $\underline{U}$  и ток  $\underline{I}$  в любой точке линии при известных значениях напряжения  $\underline{U}_2 = \underline{I}_2 Z_n$  и тока  $\underline{I}_2 = \underline{U}_2 / Z_n$  в конце линии, можно определить по уравнениям длинной линии

$$\left. \begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} y + \underline{I}_2 Z_B \operatorname{sh} \underline{\gamma} y \\ \underline{I} &= \underline{U}_2 / Z_B \operatorname{sh} \underline{\gamma} y + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} y \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где  $y$  – расстояние от конца линии до точки, где определяется напряжение  $\underline{U}$  и ток  $\underline{I}$ .

Если вместо  $y$  подставить  $l$ , то можно определить напряжение  $\underline{U}_1$  и ток  $\underline{I}_1$  в начале линии:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \operatorname{sh} \underline{\gamma} l \\ \underline{I}_1 &= \underline{U}_2 / Z_\epsilon \operatorname{sh} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} l \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

В записанные уравнения входят волновое сопротивление  $Z_\epsilon$  и комплексный коэффициент распространения  $\underline{\gamma}$ , которые определяются через первичные параметры  $R_0, L_0, C_0, G_0$ .

Волновое сопротивление

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \text{ [Ом]}. \quad (17)$$

Комплексный коэффициент распространения

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta, \quad (18)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания [Нп/км];

$\beta$  – коэффициент фазы [рад/км].

Линия без потерь – линия, у которой активное сопротивление и активная проводимость равны нулю ( $R_0 = 0, G_0 = 0$ ).

Для таких линий напряжение и ток в любой точке линии определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_2 \cos \beta y + j \underline{I}_2 Z_B \sin \beta y \\ \underline{I} &= j \frac{\underline{U}_2}{Z_B} \sin \beta y + \underline{I}_2 \cos \beta y \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где  $\beta = j \omega \sqrt{L_0 C_0}$  - коэффициент фазы;

$Z_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$  - волновое сопротивление.

Для определения напряжения  $\underline{U}_1$  и тока  $\underline{I}_1$  в начале линии подставляют  $y = l$  в уравнения (19), тогда

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cos \beta l + j \underline{I}_2 Z_B \sin \beta l \\ \underline{I}_1 &= j \frac{\underline{U}_2}{Z_B} \sin \beta l + \underline{I}_2 \cos \beta l \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Напряжение и ток в конце линии связаны между собой законом Ома.

По условию п.3  $Z_H = R_H$ , тогда  $\underline{U}_2 = \underline{I}_2 R_H$  или  $\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{R_H}$ .

Для построения графика распределения действующего значения напряжения линии без потерь в функции координаты  $y$  формулу напряжения уравнения (20) преобразовывают:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l + j \underline{U}_2 \frac{Z_B}{R_H} \sin \beta l \quad (21)$$

Обозначают  $m = \frac{Z_B}{R_H}$ ,

тогда

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l + j \underline{U}_2 m \sin \beta l \quad (22)$$

Записывают формулу (22) через модули действующих значений

$$U = U_2 \sqrt{\cos^2 \beta y + m^2 \sin^2 \beta y} \quad (23)$$

Задаваясь значениями  $y$ , определяют для каждого из них значения  $U$ .

По рассчитанным значениям строится график  $U = f(y)$ .

## ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

По воздушной линии (ВЛ) из медного провода передается сигнал с частотой  $f = 10$  кГц. Длина линии 10 км. Радиус провода  $r = 1$  мм, расстояние между осями проводов  $a = 50$  мм. Напряжение и ток в конце линии соответственно равны  $U_2 = 50$  В;  $I_2 = 20 \text{ e}^{j20}$  мА. Требуется провести расчеты в соответствии с заданием.

1. Определяются первичные параметры линии:

- сопротивление проводов двухпроводной медной линии на постоянном токе

$$r_0 = \rho \frac{8000}{\pi d^2} = \rho \frac{2550}{(2r)^2} = 0,01785 \frac{2550}{(2 \cdot 1)^2} = 11,38 \text{ [Ом/км];}$$

- поправочный коэффициент  $F(x)$ , учитывающий увеличение активного сопротивления за счет поверхностного эффекта

$$x = 7,09 \sqrt{\frac{f}{10^4 r}} = 7,09 \sqrt{\frac{10000}{10^4 \cdot 1}} = 7,09.$$

Используя линейную интерполяцию, по табл.2 определяется  $F(x) = 1,744$ , тогда

$$R_0 = r_0 [1 + F(x)] = 11,38 [1 + 1,744] = 31,22 \text{ Ом/км.}$$

Индуктивность двухпроводной линии

$$L_0 = \left[ 4 \ln \frac{a}{r} + Q(x) \mu \right] \cdot 10^{-4} = \left[ 4 \ln \frac{50}{1} + 0,408 \cdot 1 \right] 10^{-4} = 1,606 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км.}$$

Емкость двухпроводной воздушной линии на единицу длины

$$C_0 = 1,05 \frac{1}{36 \ln \frac{a}{r}} \cdot 10^{-6} = 1,05 \frac{1}{36 \ln \frac{50}{1}} \cdot 10^{-6} = 7,46 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км.}$$

Проводимость единицы длины линии

$$G_0 = G' + nf = 1 \cdot 10^{-8} + 5 \cdot 10^{-11} \cdot 10 \cdot 10^3 = 5,1 \cdot 10^{-7} \text{ См/км.}$$

2. Определяются напряжение  $\underline{U}_1$ , ток  $\underline{I}_1$ , мощности в начале и конце линии, КПД линии.

Вторичные параметры линии:

- полное комплексное сопротивление единицы длины линии

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 = 31,22 + j2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1,606 \cdot 10^{-3} = 31,22 + j100,86 = 105,58e^{j72,8^0} \text{ Ом/км.}$$

- полная комплексная проводимость единицы длины линии

$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0 = 5,1 \cdot 10^{-7} + j2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 7,46 \cdot 10^{-9} = 5,1 \cdot 10^{-7} + j4,68 \cdot 10^{-4} = 4,68 \cdot 10^{-4} e^{j89,94^0} \text{ См/км.}$$

- волновое сопротивление линии

$$Z_B = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{105,58e^{j72,8^0}}{4,68 \cdot 10^{-4} e^{j89,94^0}}} = 474,95e^{-j8,57^0} \text{ Ом}$$

- комплексный коэффициент распространения

$$\underline{\gamma} = \sqrt{Z_0 Y_0} = \sqrt{105,58e^{j72,8^0} \cdot 4,68 \cdot 10^{-4} e^{j89,94^0}} = \sqrt{0,049e^{j162,74^0}} = 0,22e^{j81,37^0} = 0,033 + j0,218;$$

$$\gamma l = \alpha l + j\beta l = (0,033 + j0,218) \cdot 10 = 0,33 + j2,18.$$

Затухание сигнала  $\alpha l = 0,33$  Нп.

Изменение фазы  $\beta l = 2,18$  рад.

Уравнения для линии с потерями через параметры конца линии

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \underline{ch} \underline{\gamma} y + \underline{I}_2 Z_B \underline{sh} \underline{\gamma} y$$

$$\underline{I} = \underline{U}_2 / Z_B \underline{sh} \underline{\gamma} y + \underline{I}_2 \underline{ch} \underline{\gamma} y$$

Для расчета напряжения и тока в начале линии  $\underline{U}_1$  и  $\underline{I}_1$  вместо  $y$  подставляется  $l$ , тогда

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \underline{ch} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 Z_B \underline{sh} \underline{\gamma} l$$

$$\underline{I}_1 = \underline{U}_2 / Z_B \underline{sh} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \underline{ch} \underline{\gamma} l$$

Рассчитывается  $\underline{ch} \underline{\gamma} l$  и  $\underline{sh} \underline{\gamma} l$ :

$$\underline{ch} \underline{\gamma} l = \underline{ch}(0,33 + j2,18) = -0,6037 + j0,2755 = 0,663e^{j55,46^0},$$

$$\underline{sh} \underline{\gamma} l = \underline{sh}(0,33 + j2,18) = -0,1923 + j0,865 = 0,886e^{j102,52^0}.$$

Если в микрокалькуляторе отсутствуют встроенные программы расчета гиперболических функций комплексного аргумента, то можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\underline{ch} \gamma l = \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2};$$

$$\underline{sh} \gamma l = \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2},$$

$$\text{где } e^{-\gamma l} = e^{\alpha l + j\beta l} = e^{0,33 + j2,18} = e^{0,33}(\cos 2,18 + j \sin 2,18) = 1,39(-0,5722 + j0,82) =$$

$$= -0,7959 + j1,14;$$

$$e^{-\alpha - j\beta l} = e^{-0,33 - j2,18} = e^{-0,33}[\cos(-2,18) + j \sin(-2,18)] = 0,7189(-0,5722 - j0,82) =$$

$$= -0,4114 - j0,5896.$$

Рассчитываются  $\underline{U}_1$  и  $\underline{I}_1$  в начале линии

$$\underline{U}_1 = 50 \cdot 0,663e^{j155,46^\circ} + 20 \cdot 10^{-3} e^{j20^\circ} \cdot 474,97e^{-j8,57^\circ} \cdot 0,886e^{j102,52^\circ} =$$

$$= 33,18e^{j155,46^\circ} + 8,4e^{j113,95^\circ} =$$

$$= j13,78 - 30,182 - 3,41 + j7,67 = -33,592 + j21,45 = 39,85e^{j147,44^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{I}_1 = 20 \cdot 10^{-3} e^{j20^\circ} \cdot 0,663e^{j155,46^\circ} + \frac{50}{474,97e^{-j8,57^\circ}} \cdot 0,886e^{j102,52^\circ} =$$

$$= 13,26 \cdot 10^{-3} e^{j175,46^\circ} + 93,26 \cdot 10^{-3} e^{j111,09^\circ} = -13,21 + j1,05 - 33,56 = j87,01 =$$

$$= (-46,77 + j88,06) \cdot 10^{-3} = 99,7 \cdot 10^{-3} e^{j117,97^\circ} \text{ А.}$$

Рассчитывается полная комплексная мощность в начале и конце линии и КПД линии

$$\tilde{S}_1 = \underline{U}_1 \underline{I}_1^* = 39,85e^{j147,44^\circ} \cdot 99,7 \cdot 10^{-3} e^{-j117,97^\circ} = 3,973e^{j29,47^\circ} = 3,46 + j1,05.$$

Мощности в начале линии:

- полная мощность  $S_1 = 3,973 \text{ ВА};$

- активная мощность  $P_1 = 3,46 \text{ Вт};$

- реактивная мощность  $Q_1 = 1,95 \text{ вар.}$

$$\tilde{S}_2 = \underline{U}_2 \underline{I}_2^* = 50 \cdot 20 \cdot 10^{-3} e^{-j20^\circ} 0,94 - j0,34.$$

Мощности в конце линии:

- полная мощность  $S_2 = 1 \text{ ВА}$ ;
- активная мощность  $P_2 = 0,94 \text{ Вт}$ ;
- реактивная мощность  $Q_2 = -0,34 \text{ вар}$ ;
- КПД линии:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{0,94}{3,46} \cdot 100\% = 27,2\% .$$

3. Для линии без потерь ( $R_0 = 0, G_0 = 0$ ) определяется напряжение  $\underline{U}_1$  и ток  $\underline{I}_1$  в начале линии, а также длина электромагнитной волны  $\lambda$  :

- сопротивление нагрузки

$$Z_H = \frac{|U_2|}{|I_2|} = \frac{50}{20 \cdot 10^{-3}} = 2500 \text{ Ом};$$

- коэффициент фазы

$$\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0} = 2\pi \cdot 10000 \sqrt{1,606 \cdot 10^{-3} \cdot 7,46 \cdot 10^{-9}} = 0,217 \text{ рад/км};$$

- изменение фазы сигнала по всей длине линии

$$\beta l = 0,217 \cdot 10 = 2,17 \text{ рад};$$

- волновое сопротивление

$$Z_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{1,606 \cdot 10^{-3}}{7,46 \cdot 10^{-9}}} = 463,98 \text{ Ом}.$$

Напряжение и ток в начале линии без потерь

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta l + j \underline{I}_2 Z_B \sin \beta l ;$$

$$\underline{I}_1 = j \frac{\underline{U}_2}{Z_B} \sin \beta l + \underline{I}_2 \cos \beta l ;$$

тогда

$$\underline{U}_1 = 50 \cos 2,17 + j 20 \cdot 10^{-3} \cdot 463,98 \sin 2,17 = -28,199 + j 7,66 = 29 e^{j164,79^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{I}_1 = 20 \cdot 10^{-3} \cos 2,17 + j \frac{50}{463,98} \sin 2,17 = -11,28 \cdot 10^{-3} + j 89 \cdot 10^{-3} = 89,71 e^{j97,22^\circ} \text{ А}.$$

Длина электромагнитной волны

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2 \cdot 3,14}{0,217} = 28,94 \text{ км}.$$



4. Для построения графика  $U=f(x)$  (рис. 1) составляется табл.3, в которой

$$U(\beta y) = U_2 \sqrt{\cos^2 \beta y + m^2 \sin^2 \beta y};$$

$$m = \frac{Z_B}{Z_H} = \frac{463,98}{2500} = 0,19;$$

$$m^2 = 0,0361.$$

Таблица 3

$\beta y$	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{2\pi}{4}$	2,17
$y, \text{ км}$	0	3,62	7,24	10
$\cos \beta y$	1	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	0	-0,564
$\cos^2 \beta y$	1	0,5	0	0,318
$\sin \beta y$	0	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	1	0,826
$\sin^2 \beta y$	0	0,5	1	0,682
$m^2 \sin^2 \beta y$	0	0,01805	0,0361	0,0246
$U(\beta y)$	50	35,99	9,5	29,2

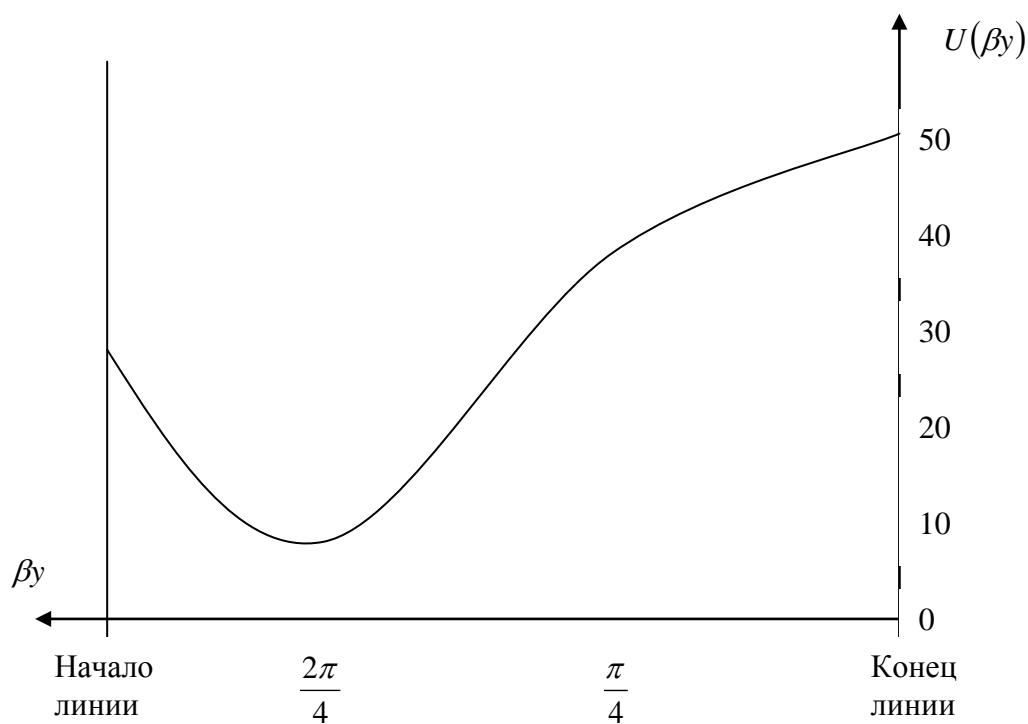


Рис. 1.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: методические указания и контрольные задания для студентов технических специальностей вузов./ Л.А. Бессонов, И.Г. Демидова, М.Е. Заруди. – М.: Высш.шк., 2003. – 159 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров. / Л.А. Бессонов. -11-е изд., перераб. и доп.- М.: Юрайт-Издат, 2012. - 701 с.: ил.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Сборник задач: учебное пособие для бакалавров. / Л.А. Бессонов. - 5-е изд., испр. и доп. - М.: Издательство Юрайт, 2014. - 527 с.
4. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники. Курс лекций: учебник для высших и средних учебных заведений. / В.А. Прянишников. - СПб.: КОРОНА-принт, 2006.- 416 с.
5. Гальперин М.В. Электротехника и электроника: учебник. – М.: ФОРУМ – ИНФРА-М, 2007.-480.: ил.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	2
2. Методические указания к выполнению, оформлению и сдаче контрольных работ.....	2
3. Содержание и объем контрольной работы.....	3
4. Оформление и сдача контрольной работы.....	3
5. Задания к контрольным работам.....	4
6. Краткие теоретические сведения для выполнения контрольных и практических работ.....	7
7. Пример выполнения работы.....	13
Литература .....	18

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ (ДЛИННЫЕ ЛИНИИ)**

Методические указания к выполнению контрольных и практических работ  
по курсу “Теоретические основы электротехники ” для студентов  
направления 140400.62 “Электроэнергетика ” всех форм обучения

Составила Большакова Валентина Юрьевна

Рецензент Н.Г. Хречков

Редактор Л.В. Максимова

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16

Бумага тип.

Усл. печ. л. 1,25

Уч. – изд. л. 1,2

Тираж 100 экз.

Заказ

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Копипринтер БИТТиУ, 413840, г. Балаково, ул. Чапаева, 140