

ФГБОУ ВПО
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

МЭИ



КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лабораторная работа № 25
Моделирование длинной линии однородной цепной схемой

Выполнил:	
Группа:	
Проверил:	

Лабораторная работа № 25

Моделирование длинной линии однородной цепной схемой

Цель работы – исследование электромагнитных процессов в длинной линии методами физического моделирования процессов в сосредоточенной электрической цепи (цепной схеме), сравнение результатов физического моделирования с результатами расчета по аналитическому описанию процессов в линии.

Ключевые слова: электрическая цепь с распределенными параметрами (длинная линия), волновое сопротивление, коэффициент распространения, бегущая волна, коаксиальный кабель, физическая модель, однородная цепная схема, математическая модель.

Объект и задача моделирования

Объект исследования: однородная длинная линия (коаксиальный кабель с совершенной изоляцией) при синусоидальных токах и напряжениях и различных режимах нагрузок. Физической моделью длинной линии является однородная цепная схема, состоящей из каскадно соединенных П-образных четырехполюсников - звеньев низкочастотных фильтров.

Задача моделирования: Процессы в модели имеют другую физическую природу, но математически они описываются теми же уравнениями, что и процессы в длинной линии без потерь. Результаты экспериментального исследования модели соотносятся с результатами исследования объекта моделирования.

Теоретическая справка

Аналитическое описание процессов в длинной линии

Линию или другое электротехническое устройство (цепь), имеющее большую протяженность в одном направлении, в которой электрические сопротивления, проводимости, индуктивности и электрические емкости распределены вдоль линии (цепи), рассматривают как *цепь с распределенными параметрами* или *длинную линию*. Линии электропередач, линии связи, высокочастотные коаксиальные линии радиотехнических и телевизионных устройств – цепи с распределенными параметрами. Линия называется *однородной*, если распределение параметров равномерно, то есть взаимное расположение, сечение проводов, параметры сред не изменяются вдоль линии. Для однородной линии определены *первичные параметры* - сопротивление, индуктивность, емкость и проводимость на единицу длины. Первичные параметры задаются как R_0 , Ом/м [Ом/км] - сопротивление прямого и обратного проводов (жилы и оболочки) на единицу длины; L_0 , Гн/м [Гн/км] – индуктивность петли, образуемой прямым и обратным проводами; C_0 , Ф/м [Ф/км] – емкость между проводами; G_0 , См/м [См/км] – проводимость между проводами. Если при описании процессов пренебрегают

сопротивлением проводников, считают изоляцию совершенной ($R_0 \approx 0$ и $G_0 \approx 0$), то двухпроводные воздушные линии и коаксиальные кабели рассматривают как *линии без потерь*. Первичными параметрами линии без потерь являются L_0 , Гн/м [Гн/км] - индуктивность на единицу длины (удельная или погонная индуктивность) и C_0 , Ф/м [Ф/км] – емкость на единицу длины (удельная или погонная емкость).

В длинных линиях токи и напряжения – функции двух переменных $i(x,t)$, $u(x,t)$, и процессы в длинных линиях математически описываются *уравнениями в частных производных*. Для облегчения анализа процессов в линиях с распределенными параметрами вводят понятия *прямых* и *обратных волн*.

$$u(x,t) = u_{\text{пр}}(x,t) + u_{\text{обр}}(x,t), \quad i(x,t) = i_{\text{пр}}(x,t) - i_{\text{обр}}(x,t).$$

Каждое из слагаемых напряжения и тока описывает *бегущую волну*. Причем первое слагаемое соответствует прямой волне – она движется в направлении возрастания координаты x , а второе слагаемое – обратной волной, которая движется в направлении убывания координаты x . Основными характеристиками бегущей волны являются *фазовая скорость* и *длина волны*. *Фазовой скоростью* волны v называется скорость перемещения фиксированной фазы колебания, перемещаясь с которой фаза остается постоянной, *длиной волны* λ называется расстояние между ближайшими двумя точками, колеблющимися в одной фазе.

При расчете установившихся режимов при синусоидальном напряжении источника заданной частоты $\omega = 2\pi f$ используют комплексный метод расчета, соответствующие им комплексные токи и напряжения остаются функцией одной пространственной координаты x :

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_{\text{пр}}(x) + \underline{U}_{\text{обр}}(x), \quad \underline{I}(x) = \underline{I}_{\text{пр}}(x) - \underline{I}_{\text{обр}}(x).$$

Вторичные параметры длинной линии: Z_c [Ом] - *волновое (характеристическое) сопротивление линии* (отношение комплексного напряжения к комплексу электрического тока синусоидальной бегущей волны) и *комплексный коэффициент распространения* $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$ (комплексная величина, характеризующая изменение амплитуды (α , [Нп/м] или [Нп/км]) и фазы (β , [рад/м] или [рад/км]) синусоидальной бегущей волны). Для линии без потерь волновое сопротивление не зависит от частоты и определяется через первичные параметры линии:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}.$$

Коэффициент распространения $\underline{\gamma} = j\beta$ ($\alpha = 0$), действительную величину β (рад/м [рад/км]) называют *коэффициентом фазы*, для линии без потерь коэффициент фазы линейно зависит от частоты: $\beta = \omega\sqrt{L_0C_0}$. Фазовая скорость для линий без потерь

не зависит от частоты: $v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$, длина волны зависит от частоты и фазовой

скорости: $\lambda = \frac{v}{f}$. Для коаксиального кабеля с совершенной изоляцией

$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0}}$, где ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость изоляции

кабеля, ε_0, μ_0 - электрическая и магнитная постоянная (принимается $\mu_r = 1$).

Замечание. Изменение фазы бегущей волны по длине линии l составит βl . Это изменение фазы будет существенно влиять на процессы в линии, если βl будет соизмерим с 2π , то есть длина линии соизмерима с длиной волны.

Распределение напряжений и токов в однородной длинной линии без потерь описывается уравнениями:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}(x) \\ \underline{I}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta x & jZ_c \sin \beta x \\ \frac{j \sin \beta x}{Z_c} & \cos \beta x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где: x - расстояние от конца линии до точки наблюдения процесса, отсчитываемое от положения нагрузки (при $x=0$ $\underline{U}_2 = \underline{U}(0)$, $\underline{I}_2 = \underline{I}(0)$, при $x=l$: $\underline{U}_1 = \underline{U}(l)$, $\underline{I}_1 = \underline{I}(l)$). (рис. 1).

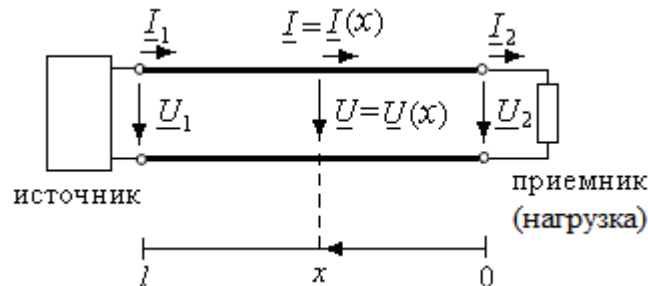


Рис. 1

Входное сопротивление линии длиной l при комплексном сопротивлении нагрузки $\underline{Z}_н$:

$$\underline{Z}_{вх} = Z_c \frac{\underline{Z}_н + jZ_c \operatorname{tg} \beta l}{Z_c + j\underline{Z}_н \operatorname{tg} \beta l}.$$

Если $\underline{U}_2 = U_2 \angle 0$, $\underline{I}_2 = I_2 \angle -\varphi_2$ (активно-индуктивная нагрузка), мгновенные значения напряжения и тока в линии без потерь имеют вид:

$$u(x,t) = \sqrt{2} U_2 \cos \beta x \sin \omega t + \sqrt{2} Z_c I_2 \sin \beta x \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varphi_2)$$

$$i(x,t) = \sqrt{2} \frac{U_2}{Z_c} \sin \beta x \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) + \sqrt{2} I_2 \cos \beta x \sin(\omega t - \varphi_2).$$

Уравнения (1) позволяют найти распределение действующих значений тока и напряжения вдоль линии для различных режимов нагрузки. В частности, при согласованной нагрузке ($Z_n = Z_c$):

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_2 (\cos \beta x + j \sin \beta x) = \underline{U}_2 e^{j\beta x}, \quad \underline{I}(x) = \underline{I}_2 (\cos \beta x + j \sin \beta x) = \underline{I}_2 e^{j\beta x},$$

т.е. действующие значения напряжения и тока не зависят от координаты x : $U(x) = U(0) = U_2 = const$, $I(x) = I(0) = I_2 = const$. Начальная фаза напряжения (тока) изменяется по закону $\varphi(x) = \varphi_{u(x)} - \varphi_{u(0)} = \varphi_{i(x)} - \varphi_{i(0)} = \beta x$, то есть пропорционально x . При согласованной нагрузке в линии существует только прямая волна. Согласованный режим линии называется *режимом бегущей волны*.

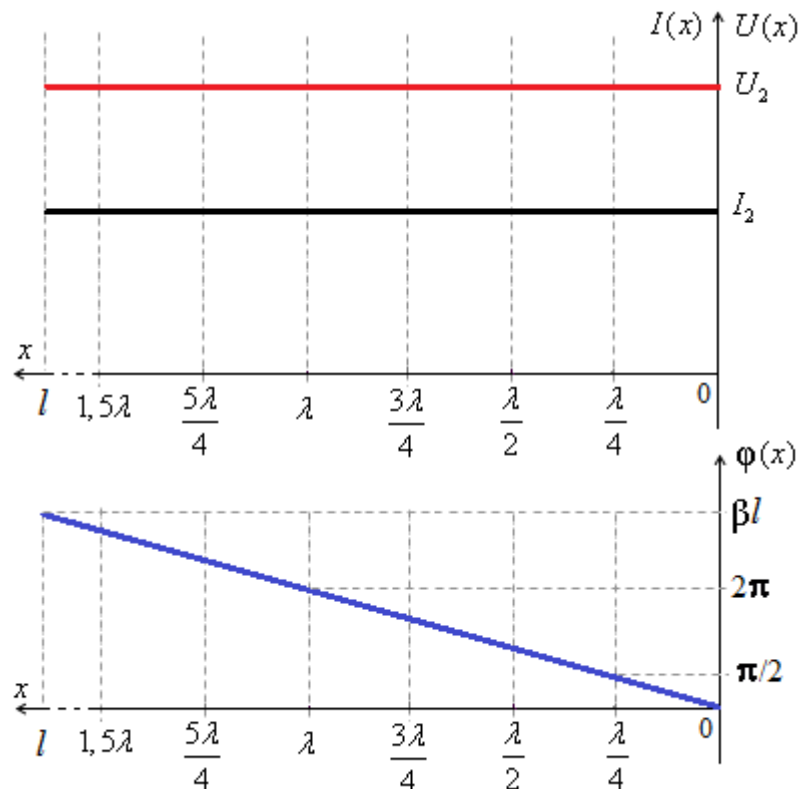


Рис. 2

При коротком замыкании ($Z_n = 0$) холостом ходе ($Z_n = \infty$) и реактивной нагрузке ($Z_n = \pm jX$) в линии распространяются прямая и обратная волны равной амплитуды, образующие *стоячие волны* в линии.

В режиме холостого хода $I_2=0$, имеем $\underline{U}(x) = \underline{U}_2 \cos \beta x$, действующее значение напряжения $U(x) = U_2 |\cos \beta x|$; $\underline{I}(x) = j \frac{U_2}{Z_c} \sin \beta x$, действующее значение тока $I(x) = \frac{U_2}{Z_c} |\sin \beta x|$.

В режиме холостого хода, если $\underline{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$ мгновенные значения напряжения и тока:

$$u(x,t) = U_{2m} \cos \beta x \sin \omega t, \quad i(x,t) = \frac{U_{2m}}{Z_c} \sin \beta x \cos \omega t$$

представляют собой уравнения стоячих волн.

На рис. 3 показано распределение действующего значения напряжения и тока вдоль разомкнутой линии.

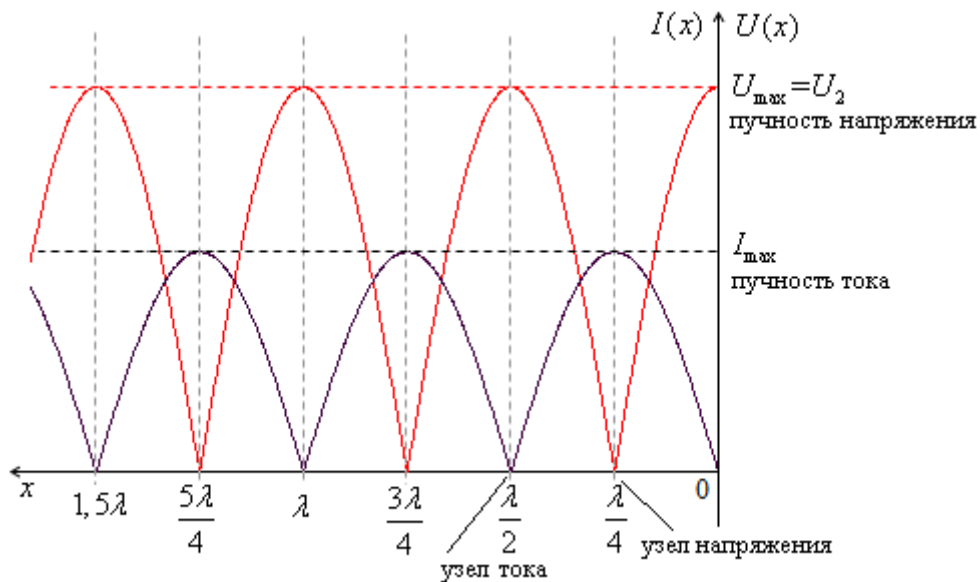


Рис. 3

При этом входное сопротивление линии, разомкнутой на конце:

$\underline{Z}_{\text{вх}}(x) = -jZ_c \text{ctg} \beta x = -jZ_c \text{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} x$. При $x < \frac{\lambda}{4}$ входное сопротивление будет емкостного характера.

При емкостной нагрузке ($\underline{Z}_n = -jX_c$) уравнение линии для напряжения

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_2 \left(\cos \beta x + \frac{jZ_c}{-jX_c} \sin \beta x \right) = \underline{U}_2 \left(\cos \beta x - \frac{Z_c}{X_c} \sin \beta x \right),$$

действующее значение напряжения $U(x) = U_2 \left| \cos \beta x - \frac{Z_c}{X_c} \sin \beta x \right|$;

$$\text{уравнение линии для тока } \underline{I}(x) = \underline{I}_2 \left(\cos \beta x + j \frac{-jX_c}{Z_c} \sin \beta x \right) = \underline{I}_2 \left(\cos \beta x + \frac{X_c}{Z_c} \sin \beta x \right),$$

$$\text{действующее значение тока } I(x) = I_2 \left| \cos \beta x + \frac{X_c}{Z_c} \sin \beta x \right|.$$

При емкостной нагрузке также наблюдается режим «стоячих волн», но в отличие от режима холостого хода в линии имеет место смещение узлов и пучностей напряжения (и тока) относительно нагрузки (Рис. 4).

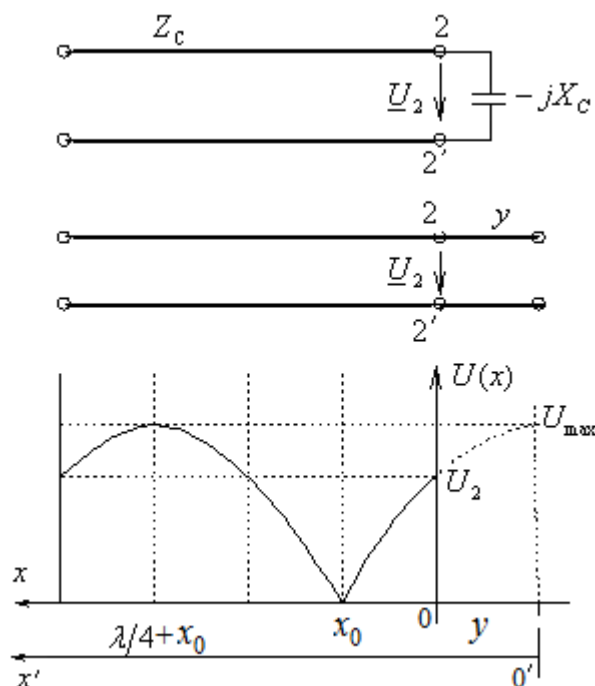


Рис. 4

Ближайший к емкостной нагрузке узел напряжения сместится на расстояние $x_0 = \frac{\lambda}{4} - y$, где y длина эквивалентного отрезка линии, разомкнутой на конце, входное сопротивление которой равно сопротивлению нагрузки: $\underline{Z}_{\text{вх}}(y) = -jZ_c \text{ctg} \beta y = -jX_{C_n}$, $Z_c \text{ctg} \beta y = \frac{1}{\omega C_n}$.

Построим распределение действующего значения напряжения и тока вдоль линии при активной нагрузке $\underline{Z}_n = R_n \neq Z_c$. Примем $\underline{U}_2 = U_2 \angle 0$. Так как $\underline{U}_2 = R_n \underline{I}_2$, уравнения линии имеют вид:

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_2 \cos \beta x + j Z_c \underline{I}_2 \sin \beta x = \underline{U}_2 \left(\cos \beta x + j \frac{Z_c}{R_H} \sin \beta x \right)$$

$$\underline{I}(x) = j \frac{\underline{U}_2}{Z_c} \sin \beta x + \underline{I}_2 \cos \beta x = \underline{I}_2 \left(j \frac{R_H}{Z_c} \sin \beta x + \cos \beta x \right)$$

Используя представление для напряжения и тока как результат наложения *прямых* и *обратных* волн $\underline{U}(x) = \underline{U}_{\text{пр}}(x) + \underline{U}_{\text{обр}}(x)$, $\underline{I}(x) = \underline{I}_{\text{пр}}(x) - \underline{I}_{\text{обр}}(x)$ можно упростить анализ режимов при произвольной нагрузке. Действующее значение напряжения $U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$, где $U_{\min} = |\underline{U}_{\text{пр}}| - |\underline{U}_{\text{обр}}|$, $U_{\max} = |\underline{U}_{\text{пр}}| + |\underline{U}_{\text{обр}}|$. При $R_H < Z_c$ минимум напряжения U_{\min} наблюдается в точках $x = 0, \lambda/2, \lambda, \dots$, максимум напряжения U_{\max} наблюдается в точках $x = \lambda/4, 3\lambda/4, \dots$. При $R_H > Z_c$ максимум напряжения U_{\max} наблюдается в точках $x = 0, \lambda/2, \lambda, \dots$, минимум напряжения U_{\min} наблюдается в точках $x = \lambda/4, 3\lambda/4, \dots$. На рис. 5 показано распределение действующего значения напряжения и тока при $Z_c = 400$ Ом и $Z_H = R_H = 200$ Ом.

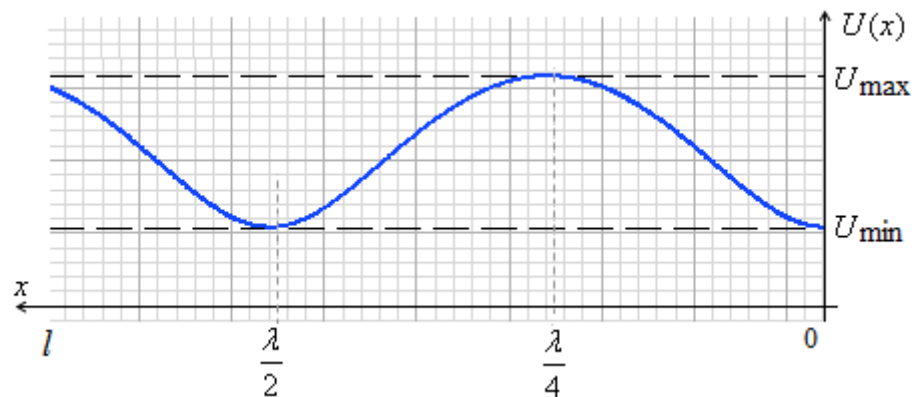


Рис. 5

Коэффициент стоячей волны $k_c = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$, при активной нагрузке если $R_H > Z_c$, то

$$k_c = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{Z_c}{R_H}, \text{ при } R_H < Z_c, \text{ то } k_c = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{R_H}{Z_c}.$$

Связь уравнений цепной схемы с уравнениями длинной линии

Физической моделью длинной линии является однородная цепная схема, состоящей из каскадно соединенных П-образных четырехполюсников - звеньев чисто реактивных низкочастотных фильтров. В данной работе используется цепочка из 10 звеньев (рис. 6), предусмотрено исследование одного звена (перемычка К отсоединяет одно звено)

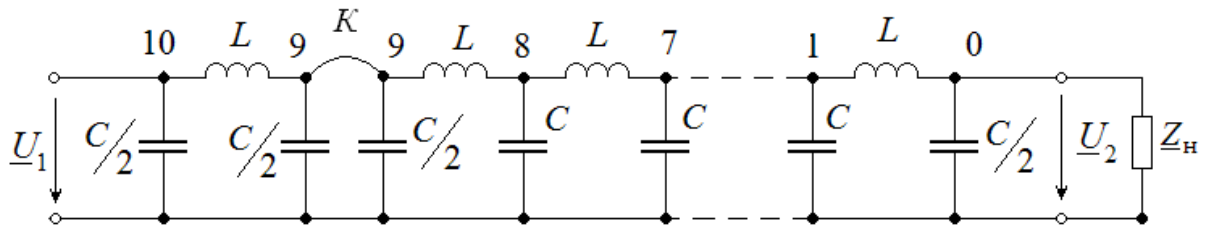


Рис. 6

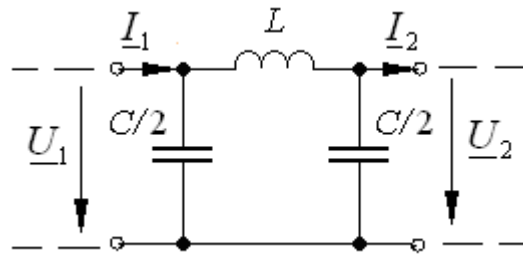


Рис. 7

Вторичными параметрами фильтра (симметричного четырехполюсника) являются *характеристическое (согласованное) сопротивление* \underline{Z}_C и *постоянная передачи* $\underline{\Gamma} = A + jB$. Низкочастотный фильтр (рис. 7) имеет полосу частот пропускания, в которой коэффициент ослабления $A = 0$ и полосу ослабления ($A > 0$), разделенные граничной частотой ω_2 . Формально первой граничной частотой считают $\omega_1 = 0$, а второй граничную частоту $\omega_2 = \frac{2}{\sqrt{LC}}$ или $f_2 = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$. Характеристическое сопротивление низкочастотного фильтра в полосе пропускания - вещественная величина Z_C . Коэффициент фазы низкочастотного фильтра в полосе пропускания ($\omega < \omega_2$) определяется из уравнения $B(\omega) = \arccos\left(1 - \frac{\omega^2 LC}{2}\right)$. Характеристическое сопротивление может быть рассчитано через входные сопротивления режима холостого хода или А-параметры фильтра как симметричного четырехполюсника. Для низкочастотного фильтра (одного звена):

$$\underline{A}_{11} = \underline{A}_{22} = 1 - \frac{\omega^2 LC}{2}, \quad \underline{A}_{12} = j\omega L, \quad \underline{A}_{21} = j\omega C(1 - \omega^2 LC) \quad Z_C = \sqrt{\frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21}}}, \quad Z_C = \sqrt{\underline{Z}_{xx} \cdot \underline{Z}_{кз}}$$

Экспериментальное значение коэффициента фазы B звена в полосе пропускания определяют по данным измерений напряжений на входе и выходе фильтра при холостом ходе. Действительно, в полосе пропускания из условия $A=0$ следует, что:

$$\underline{A}_{11} = \frac{U_{1x}}{U_{2x}} = \text{ch} \underline{\Gamma} = \text{ch}(A + jB) = \text{ch} A \cos B + j \text{sh} A \sin B = \cos B.$$

Так как $\cos B$ - действительная величина, то при холостом ходе комплексные величины \underline{U}_{1x} и \underline{U}_{2x} совпадают по фазе, а значение коэффициента B может быть найдено из соотношения действующих значений: $\cos B = \frac{U_{1x}}{U_{2x}}$.

Уравнения для звена (низкочастотного фильтра) в полосе пропускания могут быть записаны через вещественную величину Z_C и коэффициент фазы B :

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos B & jZ_C \sin B \\ \frac{j \sin B}{Z_C} & \cos B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для цепочки, нагруженной на сопротивление, равное характеристическому, состоящей из n - одинаковых каскадно-соединенных фильтров (звеньев) в полосе пропускания: $B_{n\text{-цепочки}} = n \cdot B_{\text{звена}}$, $Z_{C_{n\text{-цепочки}}} = Z_{C_{\text{звена}}}$. Уравнения для комплексов напряжения $\underline{U}(n)$ и тока $\underline{I}(n)$ на входе n - звена, при условии $\underline{U}(0) = \underline{U}_2$, $\underline{I}(0) = \underline{I}_2$:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}(n) \\ \underline{I}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos nB & jZ_C \sin nB \\ \frac{j \sin nB}{Z_C} & \cos nB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Сравнивая уравнение (3) для звена с уравнением (1) длинной линии без потерь, устанавливаем эквивалентность их описания аналогичными уравнениями и возможность моделирования длинной линии физической цепной схемой из каскадного соединения звеньев фильтра. Однако, в отличие от длинной линии без потерь, у которой параметр Z_C есть частотно-независимая расчетная величина, характеристическое сопротивление Z_C низкочастотного фильтра - частотно-зависимая величина, вне полосы пропускания - реактивная. Рабочая частота ω (f) должна находиться в полосе частот пропускания фильтра, а ее значение должно быть таким, чтобы величина коэффициента фазы B одного звена фильтра, определяющая шаг дискретизации фазы, был достаточно мал для достоверного моделирования одного периода модуля синусоидальной функции. При выборе интервала дискретизации, например, $B = \pi/8$ (или $22,5^\circ$) достаточно 16 звеньев фильтра для моделирования линии длиной в одну длины волны λ . На рис. 9 показаны зависимости постоянной передачи цепочки каскадно соединенных звеньев (фильтров) $\underline{\Gamma}_{n\text{-цепочки}} = A_{n\text{-цепочки}} + jB_{n\text{-цепочки}}$ от частоты и коэффициента распространения $\underline{\gamma}l = \alpha l + j\beta l$ линии без потерь длиной l . Цепная схема из 10 звеньев (фильтров) на рабочей частоте эквивалентна линии длиной $0,625 \lambda$ ($\beta l = Bn = 225^\circ$).

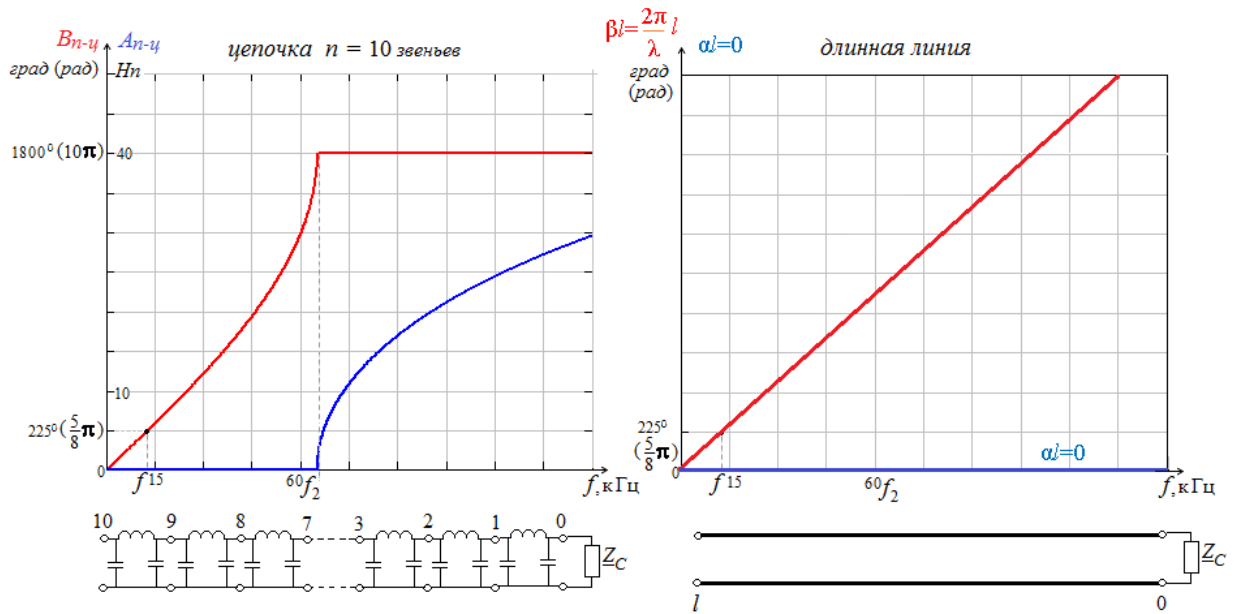


Рис. 8

В принятой модели цепной схемы имеется лишь дискретный ряд значений $\underline{U}(n)$ и $\underline{I}(n)$, аналогичных непрерывным значениям $\underline{U}(x)$ и $\underline{I}(x)$ в определенных точках длинной линии с шагом дискретизации $B = \beta l'$, определяемым одним звеном фильтра. Поэтому для цепной схемы, моделирующей длинную линию, все формулы должны быть записаны для дискретных значений напряжений узлов каскадного соединения звеньев фильтров $\underline{U}(n)$ и $\underline{I}(n)$ с заменой аргумента βx на Bn . При этом $\underline{U}(0) = \underline{U}_2$, $\underline{I}(0) = \underline{I}_2$, $\underline{U}(10) = \underline{U}_1$, $\underline{I}(10) = \underline{I}_1$. Физическая модель линии, реализованная на стенде, позволяет провести измерение лишь дискретных действующих значений напряжений $U(n)$ в узлах цепной схемы (рис. 9).

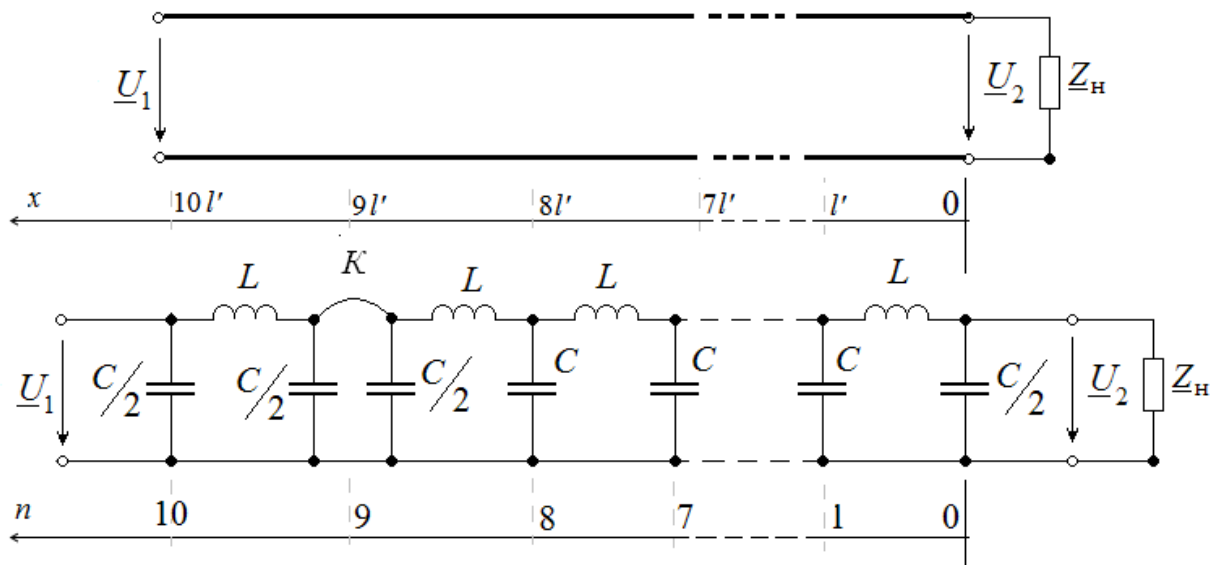


Рис. 9

Например, для режима емкостной нагрузки ($\underline{Z}_H = -jX_C$) :

$$U(n) = U_2 \left| \cos Bn - \frac{Z_C}{X_C} \sin Bn \right|, \quad I(n) = I_2 \left| \cos Bn + \frac{X_C}{Z_C} \sin Bn \right|.$$

Замечание: В лабораторной работе исследуются следующие режимы длинной линии: режим согласованной нагрузки, режим стоячих волн и режим активной нагрузки. По результатам эксперимента строятся **относительные дискретные зависимости** $\frac{U(n)}{U_2} = \frac{U(n)}{U(0)}$ при $n = 0, 1, 2, \dots, 10$, проводится сравнение с теоретическими значениями $\frac{U(x)}{U_2}$ в точках с аргументом βx , равным Bn . Делается вывод о соответствии модели (однородной цепной схемы) и физического объекта - длинной линии (коаксиального кабеля с совершенной изоляцией).

Подготовка к работе

1. Даны первичные параметры линии без потерь: $L_0 = 0,24$ мГн/км, $C_0 = 0,1$ мкФ/км. Рассчитать волновое сопротивление линии Z_C , фазовую скорость v . Считая, что в качестве длинной линии принят коаксиальный кабель с совершенной диэлектрической изоляцией, найти относительную диэлектрическую проницаемость изоляции кабеля.

2. Рассчитать граничную частоту звена низкочастотного фильтра f_2 , принимая значения параметров элементов $L=0,24$ мГн и $C = 0,1$ мкФ (рис. 7). Найти значение рабочей частоты f , для которой коэффициент фазы $B = \pi/8$ ($22,5^\circ$). Рассчитать Z_C фильтра на рабочей частоте, сравнить с расчетом волнового сопротивления линии (п.1).

3. Определить длину волны λ [км] линии без потерь (п.1) на рабочей частоте. Определить длину линии l' [км], эквивалентной одному звену фильтра цепной схемы и длину линии l [км], эквивалентной цепной схеме из 10 звеньев. Сравнить l и λ .

4. Построить относительное распределение $U(x)/U_2$ при согласованной нагрузке, отсчитывая x от конца линии. Записать выражение $U(n)/U(0)$ (отношение действующего значения напряжения соответствующего номера узла n к действующему значению напряжения на нагрузке) и рассчитать для $n = 0, 1, 2, \dots, 10$. Отметить рассчитанные значения на графике $U(x)/U_2$, на оси абсцисс указать номера узлов n , соответствующих координатам x .

5. При согласованной нагрузке построить распределение начальной фазы (аргумента) $\varphi(x) = \varphi_{u(x)} - \varphi_{u(0)}$ и распределение начальной фазы (аргумента) $\varphi(n)$ комплексного напряжения $\underline{U}(n)$. На оси абсцисс указать номера узлов n , соответствующих координатам x .

6. Построить относительное распределение $U(x)/U_2$ для линии, разомкнутой на конце (режим холостого хода), отсчитывая x от конца линии. Записать выражение

$U(n)/U(0)$ и рассчитать для $n=0,1,2,\dots,10$. Отметить рассчитанные значения на графике $U(x)/U_2$, на оси абсцисс указать номера узлов n , соответствующих координатам x .

7. Рассчитать C_H - емкость конденсатора, реактивное сопротивление которого на рабочей частоте равно входному сопротивлению одного разомкнутого звена (фильтра).

8. Построить относительное распределение $U(x)/U_2$ для линии при емкостной нагрузке $Z_H = -jX_{C_H}$ (C_H равно значению, рассчитанному в п. 7), отсчитывая x от конца линии. Записать выражение $U(n)/U(0)$ и рассчитать для $n=0,1,2,\dots,10$. Отметить рассчитанные значения на графике $U(x)/U_2$, на оси абсцисс указать номера узлов n , соответствующих координатам x . Сравнить с графиком, построенным в п.6.

9. Построить относительное распределение $U(x)/U_2$ для линии при активной нагрузке $R_H = 2Z_C$, отсчитывая x от конца линии. Определить U_{\max} и U_{\min} , k_c . Записать выражение $U(n)/U(0)$ и рассчитать для $n=0,1,2,\dots,10$. Отметить рассчитанные значения на графике $U(x)/U_2$, на оси абсцисс указать номера узлов n , соответствующих координатам x .

10. Построить относительное распределение $U(x)/U_2$ для линии при активной нагрузке $R_H = 0,2Z_C$, отсчитывая x от конца линии. Определить U_{\max} и U_{\min} , k_c . Записать выражение $U(n)/U(0)$ и рассчитать для $n=0,1,2,\dots,10$. Отметить рассчитанные значения на графике $U(x)/U_2$, на оси абсцисс указать номера узлов n , соответствующих координатам x .

Замечание: Пункты 9 и 10 выполняются по указанию Лектора.

Рабочее задание

1. Выбор рабочей частоты

Собрать цепную схему четырехполюсников из звеньев низкочастотных фильтров, установив переключку К (рис. 10). На вход цепи подать синусоидальное напряжение с действующим значением $U_{\text{вх}} \approx 5-7$ В, частотой около 12 - 13 кГц. В режиме холостого хода определить рабочую частоту f таким образом, чтобы на 4 звене (от нагрузки) был узел напряжения, т.е. $U(4) \approx 0$. В дальнейшем частоту f не изменять. Сравнить экспериментальное значение рабочей частоты и значение, рассчитанное в п.2 Подготовки к работе.

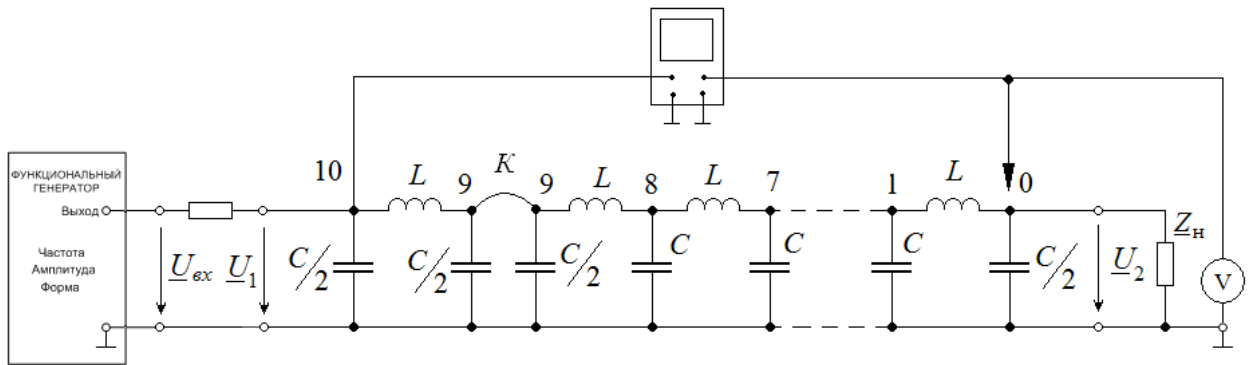


Рис. 10

2. Исследование одного звена

2.1 Отделить одно звено (фильтр), сняв перемычку К. Измерить стрелочным милливольтметром напряжения на входе и выходе звена в режиме холостого хода. По полученным данным вычислить коэффициент фазы B . Сравнить результат с рассчитанным в п.2 Подготовки к работе. Экспериментальные данные занести в таблицу.

2.2 В режиме согласованной нагрузки ($Z_n = Z_C$, рассчитанный в п.2 Подготовки к работе) проверить равенство $U_1 = U_2$. **Замечание:** При невыполнении равенства проверьте правильность выбора рабочей частоты, значения сопротивления нагрузки и результаты расчета п. 2)

2.3 По результатам экспериментов построить векторную диаграмму комплексных напряжений \underline{U}_1 и \underline{U}_2 в режиме холостого хода и при $Z_n = Z_C$.

3. Моделирование согласованного режима линии без потерь

3.1 Восстановить цепочку, установив перемычку К. Выбрать из модуля резисторов в качестве Z_C резистор с сопротивлением, близким к рассчитанному в п.1 Подготовки к работе (можно также использовать магазин сопротивлений). В режиме согласованной нагрузки при $Z_n = Z_C$ измерить действующие значения напряжений $U(n)$ в узлах цепной схемы. Экспериментальные данные занести в таблицу. Рассчитать $U(n)/U(0)$ и нанести рассчитанные значения на график п. 4 Подготовки к работе.

3.2 Измерить распределение фазы $\varphi(n)$ комплексного напряжения $\underline{U}(n)$, используя двулучевой осциллограф (принять $\varphi_{u(0)} = \varphi(0) = 0$). Для установки нулевого сдвига фаз при измерения $\varphi(n)$ подключить оба входа двулучевого осциллографа к нагрузке (точка 0). Отрегулировать кривые напряжения так, чтобы они совпадали. Между двумя максимумами синусоиды установить по шкале осциллографа 8 см (8 клеток), при этом по шкале абсцисс масштабный коэффициент составит $45^\circ/\text{см}$. Экспериментальные данные занести в таблицу, нанести значения на график п. 5 Подготовки к работе.

3.3 По результатам экспериментов построить векторную диаграмму комплексных напряжений $\underline{U}(n)$ и годограф (геометрическое место концов векторов комплексных напряжений).

4. Моделирование режима стоячих волн линии без потерь

4.1 Измерить распределение действующего значения напряжения $U(n)$ в узлах цепной схемы в режиме холостого хода ($Z_H = \infty$). Экспериментальные данные занести в таблицу. Экспериментальные данные занести в таблицу. Рассчитать $U(n)/U(0)$ и нанести рассчитанные значения на график п. 6 Подготовки к работе.

4.2 Выбрать из модуля конденсаторов конденсатор с емкостью, близкой к рассчитанной п.8 Подготовки к работе. Измерить распределение действующего значения напряжения $U(n)$ в узлах цепной схемы в режиме емкостной нагрузки ($Z_H = -jX_{C_H}$). Экспериментальные данные занести в таблицу. Экспериментальные данные занести в таблицу. Рассчитать $U(n)/U(0)$ и нанести рассчитанные значения на график п. 8 Подготовки к работе.

4.3 Сравнить данные экспериментов.

5. Моделирование режима активной нагрузки линии без потерь

5.1 Измерить распределение действующего значения напряжения $U(n)$ в узлах цепной схемы при $R_H = 2Z_C$ (использовать магазин сопротивлений). Экспериментальные данные занести в таблицу. Определить U_{\max} и U_{\min} , k_C . Рассчитать $U(n)/U(0)$ и нанести рассчитанные значения на график п. 9 Подготовки к работе.

5.2 Измерить распределение действующего значения напряжения $U(n)$ в узлах цепной схемы при $R_H = 0, 2Z_C$ (использовать магазин сопротивлений). Экспериментальные данные занести в таблицу. Определить U_{\max} и U_{\min} , k_C . Рассчитать $U(n)/U(0)$ и нанести рассчитанные значения на график п. 10 Подготовки к работе.

Таблица экспериментальных данных

Выбор рабочей частоты

Эксперимент $f =$ _____ кГц. Теоретический расчет $f =$ _____ кГц.

Исследование одного звена

$$U_{1x} = \text{_____ В}, \quad U_{2x} = \text{_____ В}, \quad \cos B = \frac{U_{1x}}{U_{2x}} = \text{_____},$$

$$B = \text{_____ град}, \quad Z_C = \text{_____ Ом}$$

Моделирование режимов линии без потерь

3	n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$U(n)$, В согласованный режим: $Z_H = Z_C = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом											
	$U(n)/U(0)$											
	$\varphi(n)$, град согласованный режим: $Z_H = Z_C = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом											
4	n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$U(n)$, В холостой ход											
	$U(n)/U(0)$											
	$U(n)$, В емкостная нагрузка: $C_H = \underline{\hspace{1cm}}$ мкФ											
	$U(n)/U(0)$											
5	n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$U(n)$, В $R_H = 2Z_C = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом											
	$U(n)/U(0)$											
	$U_{\max} = \underline{\hspace{1cm}}$ В, $U_{\min} = \underline{\hspace{1cm}}$ В, $k_C = \underline{\hspace{1cm}}$											
	n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$U(n)$, В $R_H = 0,2Z_C = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом											
	$U(n)/U(0)$											
	$U_{\max} = \underline{\hspace{1cm}}$ В, $U_{\min} = \underline{\hspace{1cm}}$ В, $k_C = \underline{\hspace{1cm}}$											

Контрольные вопросы

1. Определить показание вольтметра, включенного между нагрузкой и n^* звеном
 - а) в режиме согласованной нагрузки;
 - б) в режиме холостого хода.
2. Определить показание вольтметра, включенного между m^* и n звеньями
 - а) в режиме согласованной нагрузки;
 - б) в режиме холостого хода.
3. Определить n и m - номера звеньев, для которых в режиме холостого хода
$$\underline{Z}_{ex}(n) = \underline{Z}_{ex}(m), \underline{Z}_{ex}(n) = \underline{Z}_{ex}^*(m).$$
4. Определить n - номер звена, для которого в режиме емкостной нагрузки
$$\underline{Z}_{ex}(n) = \underline{Z}_n, \underline{Z}_{ex}(n) = \underline{Z}_n^*.$$
5. Построить распределение модуля входного сопротивления $Z_{ex}(n)$
 - а) в режиме согласованной нагрузки;
 - б) в режиме холостого хода;
 - в) при емкостной нагрузке.
6. Построить распределение действующего значения тока $I(n)$, считая значение $\underline{U}_1 = \underline{U}(10)$ известным,
 - а) в режиме согласованной нагрузки;
 - б) в режиме холостого хода;
 - в) при емкостной нагрузке.
7. Для n (номер звена) построить векторные диаграммы комплексов $\underline{U}(n)$ и $\underline{I}(n)$
 - а) в режиме согласованной нагрузки;
 - б) в режиме холостого хода;
 - в) при емкостной нагрузке.
8. Для n (номер звена) записать мгновенные значения напряжения $u_n(t)$ и тока $i_n(t)$
 - а) в режиме согласованной нагрузки;
 - б) в режиме холостого хода;
 - в) при емкостной нагрузке.
9. Известно, что линия без потерь нагружена на чисто реактивную нагрузку. Как по графику распределения действующего значения вдоль линии определить характер нагрузки?
10. Построить распределение действующего значения $U(n)$ и $I(n)$ в режиме короткого замыкания, считая значение $\underline{U}_1 = \underline{U}(10)$ известным.

* $n(m) = 1, 2, \dots, 10$ задается

11. Построить распределение действующего значения $U(n)$, если в качестве нагрузки выбрано сопротивление, равное входному сопротивлению одного короткозамкнутого звена (фильтра).
12. Построить векторные диаграммы комплексов $\underline{U}(n)$, $\underline{I}(n)$ и годограф для активной нагрузки $R_n = 2Z_C$.
13. Построить векторные диаграммы комплексов $\underline{U}(n)$, $\underline{I}(n)$ и годограф для активной нагрузки $R_n = 0,2Z_C$.
14. Рассчитать коэффициент фазы B и характеристическое сопротивление Z_C одного звена (фильтра) на частоте $5f$. Возможно ли моделирование линии однородной цепной схемой, состоящей из таких звеньев и какой будет шаг дискретизации l' ?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. Теоретические основы электротехники. Т.3. СПб. Питер, 2003.
2. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. под ред. П.А. Бутырина. Том 2 - М.: Издательский дом МЭИ, 2012.