# ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

В лекциях по дисциплине «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) рассматриваются теоретические вопросы и даются сведения описательного характера, значительно меньше внимания уделяется применению полученных знаний для решения задач, связанных с использованием методов расчета параметров и режимов работы электрических цепей.

Настоящее практическое занятие посвящено расчету электрических процессов, происходящих в длинной линии при разомкнутой и короткозамкнутой на конце линии нагрузки.

В начале практического занятия даются теоретические сведения и основные формулы, необходимые для решения задачи по нахождению распределения напряжения и тока в режимах разомкнутой и короткозамкнутой на конце линии. В конце приведен справочный материал, который используется при решении задачи.

**Тема: РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА ВДОЛЬ ЛИНИИ В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА, КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И СОГЛАСОВАННОЙ**

# НАГРУЗИ

## Цель занятия:

Овладение методикой определения распределения напряжения и тока в режиме холостого хода, короткого замыкания и согласованной нагрузки.

## Порядок выполнения практической работы

1. Ознакомиться с алгоритмом расчета распределения напряжения и тока в режиме холостого хода, короткого замыкания и согласованной нагрузки.
2. Выполнить индивидуальные задания и оформить отчет в соответствии с едиными требованиями к оформлению текстовых и графических документов.

## Указания к выполнению индивидуальных заданий

В заданиях каждый студент после ознакомления с теоретическим материалом должен решить задачу в соответствии с номером своего варианта (таблица 1). Номер варианта соответствует номеру в списке группы (См. Microsoft Teams – Теоретические основы электротехники – Файлы - Список группы для выбора варианта индивидуального задания по практическому занятию). Номер варианта индивидуального задания соответствует порядковому номеру студента в списке группы.

Отчёт по практической работе должен содержать решение задачи (образец оформления решения задачи приведен в Приложении 1).

Отчёт оформляют на листе формата А4 (по возможности с использованием оформления ПЭВМ).

Таблица 1

Исходные данные для расчета распределения напряжения и тока в режиме холостого хода и короткого замыкания.

**Исходные данные для расчета первичных параметров однородной длинной линии**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Длина линии, *l, км* | 200 | 250 | 12 | 24 | 73 | 80 | 120 |
| Волновом сопротивлении, 𝑍 в , Ом | 1579,79𝑒−𝑖140=  =1532,84-j382,18 | 614,32𝑒−𝑖90 =  =606,76-j96,10 | 986,66𝑒−𝑖30=  =985,31-j51,64 | 1408,57𝑒−𝑗14=  =1366,73-  -j340,76 | 594,06𝑒−𝑗6 =  =590,81-j62,09 | 1267,11𝑒−𝑗20=  =1190,69-  -j433,38 | 420,33𝑒−𝑗13=  =409,56-j94,55 |
| Коэффициент распространения на единицу длины однородной линии,  𝛾, 1/км | 0,023𝑒𝑗72 =  =0,0071+j0,0219 | 0,046𝑒𝑗78=  =0,0096+  +j0,0449 | 0,356𝑒𝑗76 =  =0,0861+  +j0,3454 | 0,070𝑒𝑗75 =  =0,0181+  +j0,0676 | 0,134𝑒𝑗82 =  =0,0186+  +j0,1327 | 0,061𝑒𝑗69=  =0,0219+  +j0,0569 | 0,112𝑒𝑗75 =  =0,0289+  +j0,1081 |
| Частота сигнала, *f, Гц*  𝜔*,*с−1 | 500  3140 | 1000  6280 | 5000  31400 | 1500  9420 | 3000  18840 | 2400  15072 | 3500  21980 |
| Напряжение источника питания ,  𝑈1𝑚, В | 115000 | 115000 | 115000 | 115000 | 115000 | 115000 | 115000 |

Продолжение таблицы 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Длина линии, *l, км* | 16 | 100 | 315 | 142 | 114 | 127 | 21 |
| Волновом сопротивлении, 𝑍 в , Ом | 1429,47𝑒−𝑗8 =  1415,56-j198,94 | 552,64𝑒−𝑗7 =  =548,52-j67,35 | 577,53𝑒−𝑗12 =  =564,91-j120,08 | 874,50𝑒−𝑗8 =  =865,99-j2171 | 2200,180𝑒−𝑗7 =  =2183,78-  -j268,13 | 985,47𝑒−𝑗7=  =978,12-j120,09 | 1040,54𝑒−𝑗7=  =1032,78-  -j126,81 |
| Коэффициент распространения на единицу длины однородной линии,  𝛾, 1/км | 0,054𝑒𝑗79=  =0,0103+  +j0,0530 | 0,036𝑒𝑗89=  =0,0006+  +j0,0359 | 0,022𝑒𝑗76=  =0,0053+  +j0,0213 | 0,073𝑒𝑗80 =  =0,01268+j0,0719 | 0,353𝑒𝑗82=  =0,0491+  +j0,3496 | 0,045𝑒𝑗81=  =0,0070+  +j0,0444 | 0,036𝑒𝑗81=  =0,0056+  +j0,0356 |
| Частота сигнала, *f, Гц*  𝜔*,*с−1 | 1200  7536 | 800  5024 | 300  1884 | 900  5652 | 8000  50240 | 1000  6280 | 800  5024 |
| Напряжение источника питания ,  𝑈1𝑚, В | 115000 | 115000 | 115000 | 115000 | 115000 | 115000 | 115000 |

Продолжение таблицы 1

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Длина линии, *l, км* | 65 | 43 | 48 | 23 | 92 | 200 |
| Волновом сопротивлении, 𝑍 в , Ом | 740,83𝑒−𝑗23 =  =681,94-j289,47 | 1188,11𝑒−𝑗6 =  =1181,60-  -j124,19 | 1267,44𝑒−𝑗20 =  =1191,00-j433,49 | 577,53𝑒−𝑗12=  =564,91-j120,08 | 1390,77𝑒−𝑗5 =  =1385,48-  -j121,21 | 1040,54𝑒−𝑗7 =  =1032,-j126,81 |
| Коэффициент распространения на единицу длины однородной линии,  𝛾, 1/км | 0,027𝑒𝑗65 =  =0,0114+  +j0,0245 | 0,134𝑒𝑗82=  =0,0186+  +j0,1327 | 0,091𝑒𝑗69 =  =0,0326+j0,0849 | 0,044𝑒𝑗76=  =0,0106+  +j0,0427 | 0,322𝑒𝑗84=  =0,0337+  +j0,3202 | 0,071𝑒𝑗81=  =0,0111+  +j0,0701 |
| Частота сигнала, *f, Гц*  𝜔*,*с−1 | 700  4396 | 3000  18840 | 1200  7536 | 600  3768 | 9000  56520 | 1600  10048 |
| Напряжение источника питания ,  𝑈1𝑚, В | 115000 | 115000 | 115000 | 115000 | 115000 | 115000  115000 |

# РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА, КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И СОГЛАСОВАННОЙ НАГРУЗКИ

Распределение напряжения и тока в линии зависит как от собственных параметров линии 𝛾, 𝑍в и геометрических размеров самой линии *l,* так и от характера и величины

нагрузки 𝑍н , т.е. от режима работы линии.

Рассмотрим предельные режимы работы линии, когда линия разомкнута на конце, либо замкнута накоротко.

### *Линия разомкнута на конце, т. е. когда нагрузочное сопротивление бесконечно велико.*

В линии распространяются две бегущие волны: одна — падающая — движется от генератора к концу линии, а другая — отраженная — движется в обратном направлении. В результате взаимодействия падающих и отражённых волн в линии образуются так называемые стоячие волны.

На рисунке1 показано сложение падающей и отраженной волн напряжения, для некоторого момента времени, в разомкнутой на конце линии.

*П1*

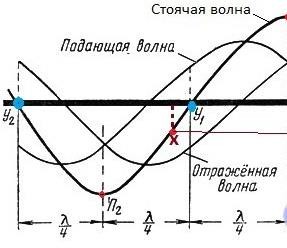


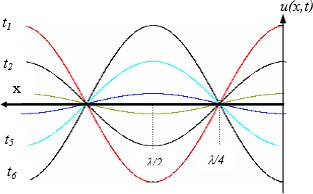
Рис. 1. К пояснению процесса образования стоячих волн

Эти волны проявляются наличием в линии максимумов (пучностей П1,П2) напряжения, а также их нулевых значений (узлов У1,У2).

Характер распределения напряжения вдоль линии при стоячей волне не изменяется с

течением времени. В разные моменты времени изменяется только величина напряжения в каждом сечении линии.

На рис.2 показано распределение напряжения вдоль разомкнутой линии для нескольких различных моментов времени на протяжении нескольких полупериодов.



1 𝜋

2

Рис. 2. Изменение напряжения вдоль линии, разомкнутой на конце, для различных моментов времени

Кривая 𝑡1 (красная линия) соответствует фазе, когда напряжение в линии наибольшее. Далее напряжение становится всё меньше и меньше (кривые 𝑡2, 𝑡3). Затем напряжение во всей линии становится равным нулю. Затем оно меняет знак и начинает возрастать (кривые𝑡4, 𝑡5, 𝑡6). Через полпериода после начала процесса напряжение снова достигает амплитудного значения, но с обратным знаком. В каждом сечении линии напряжение изменяется по синусоидальному закону. Для пучностей амплитуда наибольшая, равная двойной амплитуде бегущей волны, для других сечений она меньше, и, наконец, для узлов она равна нулю.

Все сказанное относится и к току, но в стоячей волне узлы тока получаются там, где пучности напряжения, а пучности тока находятся в узлах напряжения. Иначе говоря, стоячая волна тока сдвинута на 1/4λ или 90° относительно стоячей волны напряжения.

Графически это изображено на рисунке 3 двумя кривыми. Кривая тока дана штриховой линией, а кривая напряжения — сплошной линией.

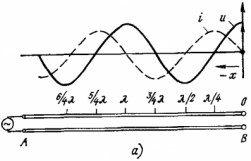


Рис. 3. Распределение токов и напряжений в длинной линии разомкнутой на конце Отношение напряжения к току – U/I в каждом сечении линии, так и на её концах

будет определять входное сопротивление линии.

### *Входным сопротивлением линии называется такое сосредоточенное* сопротивление, подключение которого вместо линии к зажимам генератора не изменит режим работы последнего.

Для анализа функциональной зависимости входного сопротивления линии от её параметров (𝑍в, 𝛾, 𝑙) и нагрузки (𝑍н) воспользуемся схемой замещения однородной длинной линии при отсчете координаты (*х)* от начала линии (рис 4),

𝐼1



𝐼𝑥

𝐼2

e(t) ~

𝑈 1

𝑈 𝑥

𝑈 2

𝑍н

х=0

х

*х=l*

*l*

Рис. 4. Схема замещения однородной длинной линии при отсчете координаты (*х)* от

начала линии для которой уравнения передачи имеют вид:

𝑈 1 = 𝑈 2 ch 𝛾𝑙 + 𝐼2 𝑍*в* sh 𝛾𝑙

{

𝐼1

= 𝐼2

ch 𝛾𝑙 + 𝑈 2 sh 𝛾𝑙 , (1)

𝑍*в*

Тогда выражение для входного сопротивления линии 𝑍*вх* с волновым сопротивлением 𝑍*в* нагруженной на сопротивление нагрузки 𝑍*н* будет иметь следующий вид:

𝑍 = 𝑈 1 = 𝑈 2 ch 𝛾𝑙+ 𝐼2 𝑍*в* sh 𝛾𝑙 = 𝐼2

𝑍*н*ch 𝛾𝑙+𝐼2 𝑍*в* sh 𝛾𝑙

= 𝑍*н*ch 𝛾𝑙+𝑍*в* sh 𝛾𝑙 =

*вх* 𝐼1

𝐼2

ch 𝛾𝑙 + 𝑈 2 sh 𝛾𝑙

𝑍*в*

𝐼2

ch 𝛾𝑙+𝐼 2 𝑍*н* sh 𝛾𝑙

𝑍*в*

ch 𝛾𝑙+ 𝑍*н* sh 𝛾𝑙

𝑍*в*

= 𝑍в

𝑍*н*ch 𝛾𝑙+𝑍*в* sh 𝛾𝑙 . (2)

𝑍вch 𝛾𝑙+𝑍*н*sh 𝛾𝑙

После деления числителя и знаменателя выражение (2) на 𝑍*в*ch 𝛾𝑙 получим

𝑍 =𝑍

𝑍*н*+𝑡ℎ𝛾𝑙

𝑍*в* . (3)

*вх* в 1+𝑍*н* 𝑡ℎ𝛾𝑙

𝑍*в*

Анализ выражения (3) показывает, что входное сопротивление является функцией параметров линии 𝛾 и 𝑍*в*, её длины 𝑙 и сопротивления нагрузки 𝑍*н* и определяется

гиперболическим тангенсом комплексного аргумента 𝛾𝑙.

Рассмотрим некоторые частные режимы работы длинной линии, при этом будем рассматривать длинную линию, у которой первичные параметры 𝑅𝑜 = 0 и 𝐺𝑜 = 0, т.е. имеет место линия без потерь (𝛼=0). Такая идеализация справедлива для коротких по длине линий, работающих на сверхвысоких частотах, где выполняются условия 𝑅𝑜 ≪ 𝜔𝐿𝑜 и 𝐺𝑜 ≪ 𝜔𝐶𝑜 и резистивными сопротивлением 𝑅𝑜 и проводимостью 𝐺𝑜 можно пренебречь по сравнению с сопротивлением индуктивности 𝜔𝐿𝑜 и проводимостью емкости 𝜔𝐶𝑜 в линии.

Если учесть, что коэффициент распространения линии без потерь равен

𝛾 = 𝛼+j𝛽 = j𝛽 = j𝜔√𝐿𝑜𝐶𝑜, (4)

а связь между гиперболическими и тригонометрическими функциями выражается следующими математическими соотношениями: ch 𝛾𝑙 = сos𝛽𝑙; sh 𝛾𝑙 = jsin𝛽𝑙 и 𝑡ℎ𝛾𝑙*=tg*𝛽*l,* то уравнения передачи (1), примет вид:

𝑈 1 = 𝑈 2 сos𝛽𝑙 + 𝑗𝐼2 𝑍*в* sin𝛽𝑙

{ 𝐼1

= 𝐼2

сos𝛽𝑙 + j 𝑈 2 sin𝛽𝑙 , (5)

𝑍*в*

и выражение (3) можно переписать в виде:

𝑍*н*+𝑗𝑍*в*tg2𝜋𝑙

𝑍 = 𝑍 𝜆 . (6)

*вх* в 𝑍*в*+𝑗𝑍*н* tg 2𝜋𝑙

𝜆

В режиме разомкнутой на конце линии, уравнения передачи (5), примут вид:

𝑈 1 = 𝑈 2 сos𝛽𝑙

{𝐼1

= j 𝑈 2 sin𝛽𝑙,

𝑍*в*

и входное сопротивление будет равно

𝑍вх хх = −j𝑍*в*𝑐𝑡𝑔𝛽𝑙 = −j𝑍*в*𝑐𝑡𝑔 2𝜋 𝑙, (7)

𝜆

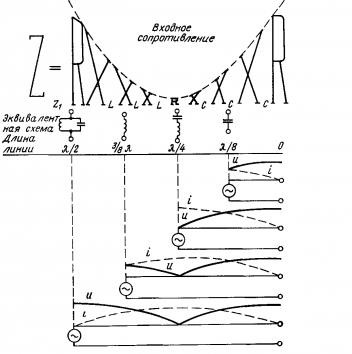
т.е. носит периодический характер (наличие периодической функции *tg* 2𝜋*l)* и имеет

𝜆

реактивный характер (множитель – «j») и вследствие разности фаз между током и

напряжением, может быть индуктивным (𝑋𝐿) или емкостным (𝑋𝐶) в зависимости от знака фазового сдвига между током и напряжением.

На рисунке 5 представлен характер изменения входного сопротивления разомкнутой на конце линии при изменении электрической длины линии.



а)

б)

в)

г)

Рис. 5. Изменение величины и характера входного сопротивления разомкнутой длинной линии (𝛼 > 0) при изменении её электрической длины

На конце линии (см. рис. 5) наблюдается нулевой уровень тока и максимальный уровень напряжения. Это означает, что входное сопротивление линии равно бесконечности.

Начиная с конца линии (см. рис. 5) входное сопротивление начинает убывать емкостная составляющая входного сопротивления - 𝑋𝐶, и достигает наименьшего значения на расстоянии 1/4 λ от конца линии. Но здесь ей противостоит столь же малая индуктивная составляющая входного сопротивления - 𝑋𝐿, возникающая в следующем участке 1/2λ ≥ 𝑙 ≥ 1\4λ длины линии. На расстоянии, равном λ/4 длины линии от конца линии (см. рис. 5)**,** напряжение равно нулю, а ток максимален. Это означает, что в этой точке входное сопротивление линии равно нулю. На расстоянии 1/4λ от конца разомкнутой на конце линии, линия представляет собой последовательный контур.

На отрезке линии между 1/4λ и 1/2λ индуктивная составляющая входное сопротивление увеличивается и в точке 1/2λ входное сопротивление снова становится

равным бесконечности. В этой точке линия представляет собой параллельный колебательный контур. Далее изменение входного сопротивления повторяется и в зависимости от своей длины разомкнутая двухпроводная линия (фидер) настраивается или как емкость, или как индуктивность подобно последовательному либо параллельному резонансному контуру.

Сдвиг фаз на 90° между током и напряжением при стоячей волне показывает, что в линии происходит колебание энергии, сходное с колебательным процессом в замкнутом колебательном контуре. Когда напряжение в линии наибольшее, а ток равен нулю, то вся энергия сосредоточена в электрическом поле. Через четверть периода напряжение равно нулю, а ток имеет наибольшее значение, и вся энергия сосредоточена в магнитном поле. Еще через четверть периода энергия снова возвратится в электрическое поле и процесс колебания энергии повторится.

***Линия короткозамкнута на конце, т. е. когда нагрузочное сопротивление бесконечно мало.***

В короткозамкнутой линии стоячая волна напряжения сдвинута на 1/4λ или 90° относительно стоячей волны тока. Графически это изображено на рисунке 6 двумя кривыми.

В случае короткозамкнутой на конце линии, входное сопротивление будет равно

𝑍вх кз = j𝑍в *tg* 2𝜋*l*, (8)

𝜆

т.е. имеет чисто реактивный характер (множитель +j) и носит периодический характер (наличие периодической функции *tg* 2𝜋*l)*

𝜆

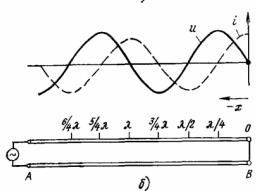


Рис. 6. Распределение токов и напряжений в длинной линии короткозамкнутой на конце

На рисунке 7 представлен характер изменения входного сопротивления короткозамкнутой линии при изменении электрической длины линии.

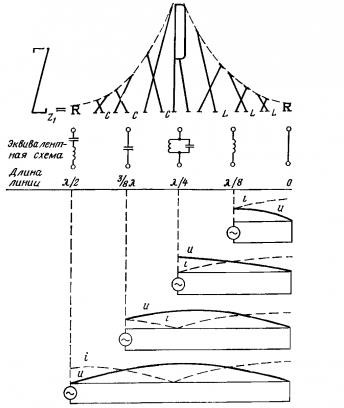


Рис. 7. Изменение величины и характера входного сопротивления короткозамкнутой длинной линии (𝛼 > 0) при изменении её длины

В точке В на конце линии (см. рис. 6) наблюдается нулевой уровень напряжения и максимальный уровень тока (пучность тока). Это означает, что на конце линии входное сопротивление линии 𝑍вх = 0.

Начиная с закороченного конца линии (см. рис. 7) начинает возрастать индуктивная составляющая входного сопротивления - 𝑋𝐿, которая достигает наибольшего значения на расстоянии 1/4 λ от конца линии. Но здесь ей противостоит столь же большая емкостная составляющая входного сопротивления - 𝑋𝐶, возникающая в следующем участке 1\4λ длины линии.

На расстоянии, равном λ/4 электрической длины линии от точки В (см. рис. 6)**,** ситуация обратная, т. е. напряжение максимально, а ток равен нулю

На расстоянии 1/4λ от конца закороченной линии, линия представляет собой параллельный контур и полное сопротивление линии в этой точке становится равным бесконечности.

На отрезке линии между 1/4λ и 1/2λ емкостная составляющая входное сопротивление уменьшается до нуля и в точке 1/2λ входное сопротивление становится равным нулю. В этой точке линия представляет собой последовательный колебательный контур. Далее изменение входного сопротивления повторяется и в зависимости от своей длины короткозамкнутая двухпроводная линия (фидер) настраивается или как индуктивность, или как емкость подобно последовательному либо параллельному резонансному контуру.

Также как и линии разомкнутой на конце, в короткозамкнутой линии, сдвиг фаз на 90° между током и напряжением при стоячей волне показывает, что в линии происходит колебание энергии, сходное с колебательным процессом в замкнутом колебательном контуре. Когда напряжение в линии наибольшее, а ток равен нулю, то вся энергия сосредоточена в электрическом поле. Через четверть периода напряжение равно нулю, а

ток имеет наибольшее значение, и вся энергия сосредоточена в магнитном поле. Еще через четверть периода энергия снова возвратится в электрическое поле и процесс колебания энергии повторится.

Эти свойства двухпроводной линии (фидера) позволяют использовать их как резонансные элементы в колебательных контурах, фильтрах и согласующих устройствах. Отрезки линии, представляющие собой эквиваленты индуктивности, ёмкости или колебательного контура, могут иметь длину менее 1/4λ. Это позволяет подбором длины линии получить необходимую индуктивность или ёмкость. Например, нужную индуктивность можно получить из короткозамкнутой линии длиной меньше 1/4λ, а из разомкнутой линии длиной менее 1/4λ можно получить необходимую ёмкость. Замкнутая линия длиной 1/4λ представляет собой параллельный колебательный контур, а эта

же разомкнутая линия превратится в последовательный колебательный контур.

На рисунках 5 и 7 представлены разные возможности использования разомкнутой или короткозамкнутой линии в качестве согласующего элемента.

# АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА, КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И

**СОГЛАСОВАННОЙ НАГРУЗКИ**

## Исходные данные.

По заданным вторичным параметрам однородной длинной линии длиной *l* км, волновом сопротивлении 𝑍в [Ом], коэффициенте распространения однородной линии

𝛾 [1⁄км], и частоте *f* [Гц] и напряжение источника питающего линию изменяется по закону u(t) = 𝑈1𝑚sin 𝜔𝑡, где 𝑈1𝑚 = 115000 В (см. таблицу «Исходные данные для расчета распределения напряжения и тока в режиме холостого хода и короткого замыкания»)

* 1. Построить эпюры распределения напряжения и тока вдоль линии для случаев:
* короткого замыкания;
* холостого хода;
* согласованной нагрузки.
  1. Определить, при какой частоте в заданной линии будет укладываться одна

четверть волны (*l* = 𝜆).

4

## Решение:

### *Распределение напряжения и тока вдоль линии при холостом ходе.*

Для анализа распределение напряжения и тока вдоль лини используется схема замещения длинной линии

𝐼1



𝐼𝑥

𝐼2

e(t) ~

𝑈 1

𝑈 𝑥

𝑈 2

𝑍н

х=0

х

*х=l*

*l*

Уравнения передачи однородной длинной линии для напряжения 𝑈 𝑥 и тока 𝐼𝑥

для

произвольного сечения линии *x* через напряжения 𝑈 1 и тока 𝐼1 в начале линии при отсчете координаты *х* от начала линии имеют вид:

𝑈 𝑥 = 𝑈 1 ch 𝛾𝑥 − 𝐼1 𝑍в sh 𝛾𝑥

{

𝐼𝑥

= 𝐼1

ch 𝛾𝑥 − 𝑈 1 sh 𝛾𝑥 . (1)

𝑍в

При холостом ходе выражения (1) будем иметь

𝑈 𝑥 = 𝑈 10 ch 𝛾𝑥 − 𝐼10𝑍в sh 𝛾𝑥

{

𝐼𝑥

= 𝐼10

ch 𝛾𝑥 − 𝑈 10 sh 𝛾𝑥 . (2)

𝑍в

Определяем действующее значение тока в начале линии для разомкнутой на конце линии

𝐼10

= 𝑈 10, А (3)

𝑍10

где 𝑈 10 = |𝑈10|𝑒𝑗𝜓1𝑢|𝑈10|𝑒𝑗𝜓1𝑢| – действующее значение напряжения в начале линии при

𝜓1𝑢= 0, равно |𝑈10| = 115000 = 66500, В.

√3

***Полезная информация.*** *Входное сопротивление линии определяется отношением*

*напряжения* 𝑈 1 *и тока* 𝐼1 *в начале линии (x = 0)*

𝑈1

𝑍вх

*=* 𝐼1 *. (1-1)*

*По условиям задачи нам заданы ток при холостом ходе* 𝐼2 *= 0 и напряжение при*

*коротком замыкании* 𝑈 2 *=0, т.е. в конце линии. Следовательно, при отсчете координаты*

(х ′) *от конца линии* (х ′) *(см. рис.1-1),*

𝐼1



𝐼𝑥

𝐼2

e(t) ~

𝑈 1

𝑈 𝑥

𝑈 2

𝑍н

х=0

х

х′

*l*

*Рис. 1-1*

*х=l*

*уравнения передачи однородной длинной линии для напряжения* 𝑈 𝑥 *и тока* 𝐼𝑥 *в*

*произвольной точке (*х ′ = 𝑙 − 𝑥) *линии через напряжение* 𝑈 2 *и ток* 𝐼2 *в конце линии будут иметь вид*

𝑈 𝑥 = 𝑈 2 𝑐ℎ 𝛾х′ + 𝐼2 𝑍в 𝑠ℎ 𝛾х′

{

𝐼𝑥

= 𝐼2

𝑐ℎ 𝛾х′ + 𝑈 1 𝑠ℎ 𝛾х′ *. (1-2)*

𝑍в

*Поскольку мы определяем входное сопротивление в начале линии, то* х ′*=l и уравнения передачи (1-2) будет иметь вид*

𝑈 1 = 𝑈 2 𝑐ℎ 𝛾𝑙 + 𝐼2 𝑍в 𝑠ℎ 𝛾𝑙

{

𝐼1

= 𝐼2

𝑐ℎ 𝛾𝑙 + 𝑈 2 𝑠ℎ 𝛾𝑙 . *(1-3)*

𝑍в

*В режиме холостого хода (*𝑍н *=* ∞, 𝐼2 *= 0), уравнение передачи однородной длинной*

*линии относительно напряжения* 𝑈 1хх *и* 𝐼1хх *через напряжения* 𝑈 2 *и тока* 𝐼2

*трансформируются*

𝑈 1хх = 𝑈 2𝑐ℎ𝛾𝑙

{

𝐼

1хх

= 𝑈 2 𝑠ℎ𝛾𝑙 . *(1- 4)*

𝑍в

*и входное сопротивление линии в режиме холостого хода будет равно*

𝑍

𝑈

1хх

𝑈 𝑐ℎ𝛾𝑙

2

𝑐ℎ𝛾𝑙

𝑍в

Z

в

вх.хх

*=* =

𝐼1 хх

𝑈 2𝑠ℎ𝛾𝑙

= 𝑍

в 𝑠ℎ𝛾𝑙

= 𝑍 𝑐𝑡ℎ𝛾𝑙 = = , *(1-5)*

в

𝑡ℎ𝛾𝑙

𝑍в

shγх

chγх

𝑠ℎ𝛾𝑙

*где* 𝑡ℎ𝛾𝑙 *=* 𝑐ℎ𝛾𝑙 *- гиперболический тангенс с комплексным аргументом.*

После подстановки исходных данных γ и l (см. таблицу «Исходные данные для

расчета распределения напряжения и тока в режиме холостого хода и короткого замыкания), в выражение комплексного аргумента

Z10 = Zвх.хх = Zв =

shγх

Z

в

thγl

,Ом (4)

chγх

и используя таблицы круговых, показательных и гиперболических функций (Приложение 1) находим значения гиперболического синуса

shγl = sh(α + jβ)l = sh(αl + jβl)= sh αlcosβl + j chαlsinβl, (5) гиперболического косинуса

chγl = ch(α + jβ)l = chαlcosβl + jsh αlsin βl. (6)

определяем γх; shγх; и chγх для сечения *х=l*, которые входят в выражения (2).

Для сечений линии с координатами *0; l/4; l/2; 3l/4; l* км, отсчитываемых от её начала определяем 𝛾х; sh𝛾х; и ch𝛾х, которые входят в выражения (2), при этом учитывая формулы (6) и (7) для тригонометрических и гиперболических функций комплексного

переменного 𝛾=𝛼 +j𝛽. Результаты расчетов сводим в таблицу 1.

Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *l*, км | 𝛼𝑙 | 𝛽𝑙 | sh𝛼𝑙 | ch𝛼𝑙 | 𝑐𝑜𝑠𝛽𝑙 | 𝑠𝑖𝑛𝛽𝑙 | *сh*𝛾𝑙 | *sh*𝛾𝑙 | *th*𝛾𝑙 |
| 0 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *l/4* |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *l/2* |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *3l/4* |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *l* |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

***Полезная информация.*** *В случае если комплексное число, например,* 𝛾𝑙 *=* 𝛼𝑙 + 𝑗𝛽𝑙 =

0,4 + 𝒋𝟒𝟔, 𝟓𝟒*, имеет численное значение мнимой части (*𝑗46,54*) больше 2*𝜋 *радиан, то для того чтобы вычислить численное значение периодических функций сos*𝛽𝑙 *или sin*𝛽𝑙 *необходимо воспользоваться свойством периодичности тригонометрических функций.*

### *Периодической называется функция, которая повторяет свои значения через* какой-то регулярный интервал, то есть не меняющая своего значения при добавлении к аргументу фиксированного ненулевого числа (периода функции): существует такое ненулевое число T (период), что на всей области определения функции выполняется равенство f(x)=f(x±*T).*

*Тригонометрические функции (синус, косинус) являются периодическими. Наименьший период функций синус и косинус составляет 2π или 3600.*

*Таким образом,*

*sin(α±2πk)=sinα*

*где k =* 𝛼

2𝜋

*cos(α±2πk)=cosα*

− *целое число периодов периодических функций косинус и синус.*

*Тогда численное значение периодических функций косинус и синус для нашего случая будут равны:*

*cos* 𝛽𝑙 *=cos46,54=cos (46,54*−*7·6,28)=cos2,58=*−*0,83*

*где k =* 46,54*=7- целое число периодов периодических функций косинус и синус*

6,28

*sin*𝛽𝑙*=sin46,54=sin(46,54*−*7·6,28)=sin2,58=0,55.*

Для найденных значений 𝛾х; sh𝛾х; и ch𝛾х, используя выражения (2), определяем напряжение и ток в сечениях линии х = 0; 1/4*l*; 1/*l*2; *3l/4* и *l* км.

Результаты расчетов сводим в таблицу 2.

Таблица 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| х, км | Режим холостого хода | |
| Ток, А | Напряжение, В |
| 0 |  |  |
| *l/4* |  |  |
| *l/2* |  |  |
| *3l/4* |  |  |
| *l* |  |  |

По данным расчетов строим эпюры распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии при холостом ходе (рис. 1).

U, В

**\***

\*

I, А

U

\*

**\***

\*

\*

\*

**\***

I

**\***

**\***

0 *l/4 l/2 3l/4 l* км

Рис. 1. Эпюры распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии при холостом ходе

1. ***Распределение тока и напряжения вдоль линии при коротком замыкании.*** Определяем действующее значение тока в начале линии для короткого замыкания в линии

𝐼1к

= 𝑈 1к, А

𝑍1к

где 𝑈 1к = |𝑈1к|𝑒𝑗𝜓1𝑢|𝑈10|𝑒𝑗𝜓1𝑢| – действующее значение напряжения в начале линии при

𝜓1𝑢= 0, равно |𝑈1к| = 115000 = 66500, В;

√3

***Полезная информация.*** *Входное сопротивление линии определяется отношением напряжения* 𝑈 1 *и тока* 𝐼1 *в начале линии (x = 0)*

𝑍 *=* 𝑈 1*. (2-1)*

вх

𝐼1

*По условиям задачи нам заданы ток при холостом ходе* 𝐼2 *= 0 и напряжение при коротком замыкании* 𝑈 2 *=0, т.е. в конце линии. Следовательно, при отсчете координаты* (х ′) *от конца линии* (х ′) *(см. рис.2-1),*

𝐼1



𝐼𝑥

𝐼2

e(t) ~

𝑈 1

𝑈 𝑥

𝑈 2

𝑍н

х=0

х

х′

*l*

*Рис. 2-1*

*х=l*

*уравнения передачи однородной длинной линии для напряжения* 𝑈 𝑥 *и тока* 𝐼𝑥 *в произвольной точке (*х ′ = 𝑙 − 𝑥) *линии через напряжение* 𝑈 2 *и ток* 𝐼2 *в конце линии будут иметь вид*

𝑈 𝑥 = 𝑈 2 𝑐ℎ 𝛾х′ + 𝐼2 𝑍в 𝑠ℎ 𝛾х′

{

𝐼 = 𝐼 𝑐ℎ 𝛾х + 𝑠ℎ 𝛾х

𝑥 2

′

𝑈

1

′

. *(2-2)*

𝑍в

*Поскольку мы определяем входное сопротивление в начале линии, то* х ′*=l и уравнения передачи (1-2) будет иметь вид*

𝑈 1 = 𝑈 2 𝑐ℎ 𝛾𝑙 + 𝐼2 𝑍в 𝑠ℎ 𝛾𝑙

{

𝐼 = 𝐼 𝑐ℎ 𝛾𝑙 + 𝑠ℎ 𝛾𝑙

𝑈

. *(2-3)*

1 2

2

𝑍в

*Найдем входное сопротивление* 𝑍вх *отрезка длинной линии l с волновым сопротивлением* 𝑍в *в режиме короткого замыкания .*

*В режиме короткого замыкания (*𝑍н *= 0*, 𝑈 2 *= 0) уравнение передачи однородной*

*длинной линии (1-3) относительно комплексных значений напряжения* 𝑈 1кз *и* 𝐼1кз *в начале*

*линии через напряжения* 𝑈 2 *и тока* 𝐼2

*в конце линии при отсчете координаты (*х ′ = 𝑙 −

𝑥) *от конца имеют вид*

{ 𝐼

𝑈 1кз = 𝐼2 𝑍в𝑠ℎ𝛾𝑙

. *(2-4)*

1кз 2

= 𝐼 𝑐ℎ𝛾𝑙

*Тогда входное сопротивление линии в режиме короткого замыкания будет равно*

𝒁

𝑼

𝟏кз

𝑰 𝒁 𝒔𝒉𝜸𝒍

вх.кз

***=***

𝑰 𝟏кз =

𝟐 в

𝑰 𝟐𝒄𝒉𝜸𝒍

= 𝒁

𝒄𝒉𝜸𝒍

в 𝒔𝒉𝜸𝒍

= 𝒁 𝒕𝒉𝜸𝒍***. (2-5)***

в

*По выражению (5) и найденному значению гиперболического тангенса, определяем входное сопротивление в режиме короткого замыкания*

𝑍вх.кз *=* 𝑍в𝑡ℎ𝛾𝑙*. Ом (2-6)*

𝑍 = 𝑍

= 𝑈 1к = 𝑍 𝑡ℎ𝛾𝑙 = 𝑍

shγх

, Ом - входное сопротивление линии в режиме

1к вх.кз

𝐼1к в

в chγх

короткого замыкания.

По выражениям (1), для принятых сечений с координатами х = 0; 1/4*l*; 1/*l*2; *3l/4* и *l* км, отсчитываемых от её начала, х (см. табл. «Исходные данные для расчета распределения напряжения и тока в режиме холостого хода и короткого замыкания) определяем напряжение и ток.

Вычисленные значения токов и напряжений при коротком замыкании линии сводим в таблицу 3, а построенные по результатам вычислений эпюры распределения токов и напряжений вдоль линии приведены на рисунке 2.

Таблица 3

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| х, км | Режим короткого замыкания | |
| Ток, А | Напряжение, В |
| 0 |  |  |
| *l/4* |  |  |
| *l/2* |  |  |
| *3l/4* |  |  |
| 0 |  |  |

По данным расчетов строим эпюры распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии при коротком замыкании (рис. 2).

U, В

I, А

I

**\***\*

\*

\*

\*

\*

**\***

**\***

U

**\***

**\***

0 *l/4 l/2 3l/4 l* км

Рис. 2. Распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии при коротком замыкании

### *Распределение токов и напряжений вдоль линии при согласованной нагрузке.*

Распределение токов и напряжений вдоль линии при согласованной нагрузке (𝑍н = 𝑍в), определяется аналогично режимам холостого хода и короткого замыкания. Особенность данного режима является то, что в любом сечении линии входное сопротивление её остается постоянным и равным волновому

𝑍вх = 𝑍в . Ом

Ток в начале линии, нагруженной на 𝑍н = 𝑍в , будет равен

𝐼1

= 𝑈 1 . А

𝑍в

По выражениям (1) находим значение напряжения и тока в сечениях с координатами х = 0; 1/4*l*; 1/*l*2; *3l/4* и *l* км, принятых ранее (см. табл. 1). Вычисленные значения токов и напряжений сведены в таблицу 4.

Таблица 4

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| х, км | Режим согласованной нагрузки | |
| Ток, А | Напряжение, В |
| 0 |  |  |
| *l/4* |  |  |
| *l/2* |  |  |
| *3l/4* |  |  |
| 0 |  |  |

На рисунке 3 приведены эпюры распределения действующих значений тока и напряжения вдоль линии, работающей в режиме согласованной нагрузки.

U, В

**\***

\*

I, А

\*

**\***

I

\*

**\***

U

\*

**\***

\*

**\***

0 *l/4 l/2 3l/4 l* км

Рис. 3. Распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии при согласованной нагрузке

### *Определение частоты, при которой в заданной линии будет укладываться* одна четверть волны, т.е. l = 𝝀 *или λ = 4 l.*

𝟒

Для этого используем соотношения:

λ = 2𝜋

𝛽

и

𝑣 = 𝜔 = 2𝜋𝑓 = 2𝜋𝑓 = *fλ*

Откуда

ф 𝛽

𝛽 2𝜋

𝜆

*f =* 𝑣ф

𝜆

или при длине волны, равной λ = 4*l* имеем

*f =* 𝑣ф *=*𝑣ф, 1⁄с

𝜆 4𝑙

где 𝑣ф = 300000 км⁄с – скорость электромагнитной волны в вакууме.

Приложение 1

## Образец формы титульного листа отчета по практическому занятию и содержание пунктов отчета

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Уральский государственный горный университет» Кафедра Электротехники



# ОТЧЕТ

**по практическому занятию №**

**по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»**

# ТЕМА: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

## (наименование темы)

|  |  |
| --- | --- |
| Студент(ка) гр. |  |
| Дата выполнения практического занятия Преподаватель |  |

Екатеринбург 202

## Исходные данные:

По заданным вторичным параметрам однородной длинной линии длиной *l* км, волновом сопротивлении 𝑍в Ом, коэффициенте распространения однородной линии 𝛾 1⁄км

и частоте *f* Гц (см. таблицу 1 «Исходные данные для расчета распределения напряжения и тока в режиме холостого хода и короткого замыкания») построить эпюры распределения напряжения и тока вдоль линии для случаев короткого замыкания, холостого хода и согласованной нагрузки, если напряжение источника питающего линию изменяется по закону u = 𝑈1𝑚sin 𝜔𝑡, где 𝑈1𝑚 = 115000 В.

Определить, при какой частоте в заданной линии будет укладываться одна четверть

волны (*l* = 𝜆).

4

Таблица

|  |  |
| --- | --- |
| Длина линии, *l, км* | 100 |
| Волновом сопротивлении, 𝑍 в , Ом | 450𝑒−𝑗18 |
| Коэффициент распространения на единицу длины однородной линии,  𝛾, 1/км | 1,13·10−3𝑒𝑗71 |
| Частота сигнала, *f,* Гц | 50 |
| Напряжение источника питания , 𝑈1𝑚, В | 115000 |

## Решение:

1. Найдем распределение напряжения и тока вдоль линии при холостом ходе. Воспользуемся уравнениями передачи однородной длинной линии для комплексных

действующих значений напряжения 𝑈 𝑥 и тока 𝐼𝑥 с гиперболическими функциями в

произвольном сечении *х* линии через комплексные действующие значения напряжения 𝑈 1

и тока 𝐼1

в начале линии

𝑈 𝑥 = 𝑈 1 ch 𝛾𝑥 − 𝐼1 𝑍в sh 𝛾𝑥

{

𝐼𝑥

= 𝐼1

ch 𝛾𝑥 − 𝑈 1 sh 𝛾𝑥 . (1)

𝑍в

Подставив в выражения (1) вместо комплексных действующих значений

напряжения 𝑈 1 и тока 𝐼1 в начале линии комплексные действующие значения напряжения

𝑈 10 и тока 𝐼10 в начале линии при холостом ходе, будем иметь

𝑈 𝑥 = 𝑈 10 ch 𝛾𝑥 − 𝐼10𝑍в sh 𝛾𝑥

{

𝐼𝑥

= 𝐼10

ch 𝛾𝑥 − 𝑈 10 sh 𝛾𝑥 . (2)

𝑍в

Определим действующее значение тока в начале линии при холостом ходе

𝐼 = 𝑈 10 = 115000

= 15,9 𝑒𝑗89, А

10 𝑍10

√3 · 4180𝑒−𝑗89

где 𝑈 10 = |𝑈10|𝑒𝑗𝜓1𝑢|𝑈10|𝑒𝑗𝜓1𝑢|, при 𝜓1𝑢= 0 равно |𝑈10| = 115000 = 66500, В – действующее значение напряжения в начале линии при холостом ходе;

√3

𝑍 = 𝑍

= 𝑍в = 450𝑒−𝑗18·0,994𝑒𝑗12′ = 4180𝑒−𝑗89, Ом - входное сопротивление линии в

10 вх.хх

𝑡ℎ𝛾𝑙

0,107𝑒𝑗71

режиме холостого хода.

Для сечений линии с координатами х = 0; 25; 50; 75 и 100 км , отсчитываемых от её начала, определяем 𝛾х; sh𝛾х; и ch𝛾х, которые входят в выражения (2).

Результаты расчетов сведены в таблицу 1

Таблица 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| х, км | 𝛾х | sh𝛾х | ch𝛾х |
| 0 | 0 | 0 | 1 |
| 25 | 0,0088+j0,0268 | 0,028𝑒𝑗90 | 1 |
| 50 | 0,0176+j0,0536 | 0,00176+j0,059=0,059𝑒𝑗88 | 0,998+j0,0104=0,998𝑒𝑗4′ |
| 75 | 0,0264+j0,0804 | 0.0263+j0,0795=0,084𝑒𝑗72 | 0,997+j0,0021=0,997𝑒𝑗6′ |
| 100 | 0,0353+j0,107 | 0,0351+j0,107=0,107𝑒𝑗71 | 0,994+j0,0038=0,994𝑒𝑗12′ |

Определим напряжение и ток для сечения линии х = 25 км

𝑈 25 = 𝑈 10 ch 𝛾𝑥 − 𝐼10𝑍в sh 𝛾𝑥 = 66500·1−15,9 𝑒𝑗89·450𝑒−𝑗18·0,028𝑒𝑗90 =

= 66690 –j63,2 = 66700𝑒−𝑗3′, В

𝐼 = 𝐼

ch 𝛾𝑥 − 𝑈 10 sh 𝛾𝑥 = 15,9 𝑒𝑗89·1 − 66500

·0,028𝑒𝑗90 = 1,818+j11,83 = 11,9𝑒𝑗81. А

25 10

𝑍в

450𝑒−𝑗18

Аналогично определяем напряжение и ток для остальных сечений линии. Результаты расчетов сведены в таблицу 2. По данным расчетов построены эпюры распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии при холостом ходе (рис. 1).

Таблица 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| х, км | Режим холостого хода | |
| Ток, А | Напряжение, В |
| 0 | 15,9 𝑒𝑗89 | 66500 |
| 25 | 11,9𝑒𝑗81 | 66700𝑒−𝑗3′ |
| 50 | 7,98𝑒𝑗81 | 66740𝑒−𝑗6′ |
| 75 | 3,45𝑒𝑗89 | 66780𝑒−𝑗10′ |
| 100 | 0 | 66800𝑒−𝑗12′ |

По данным расчетов строим эпюры распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии при холостом ходе (рис. 1).

U, В

70000

60000

50000

40000

30000

20000

10000

**\***

\*

I, А

U

\*

**\***

\*

\*

\*

12

8

**\***

I

4

**\***

**\***

0 20 40 60 80 100 х, км

Рис. 1. Распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии при холостом ходе

1. По аналогии определяем распределение тока и напряжения вдоль линии при коротком замыкании.

Предварительно вычисляем ток короткого замыкания в начале линии

𝐼 = 𝑈 1к = 115000

= 1370 𝑒−𝑗53, А

1к 𝑍1к

√3 · 48,5𝑒𝑗53

где 𝑈 1к = |𝑈1к|𝑒𝑗𝜓1𝑢|𝑈10|𝑒𝑗𝜓1𝑢|, при 𝜓1𝑢= 0 равно |𝑈1к| = 115000 = 66500, В – действующее значение напряжения в начале линии при холостом ходе;

√3

𝑍 = 𝑍

= 𝑈 1к = 𝑍 𝑡ℎ𝛾𝑙. = 450𝑒−𝑗18·0,994𝑒𝑗12′ = 48,5 𝑒𝑗53, Ом - входное сопротивление

1к вх.кз

𝐼1к в

0,111𝑒𝑗69

линии в режиме короткого замыкания.

По уравнениям (2), где вместо 𝑈 1 и 𝐼1 , подставляем 𝑈 1к и 𝐼1к для принятых сечений х (см. табл. 1) определяем напряжение и ток.

Так, например, для х = 25 км имеем:

𝑈 25 = 𝑈 1к ch 𝛾𝑥 − 𝐼1к𝑍в sh 𝛾𝑥 = 66500·1−1370 𝑒 −𝑗53·450𝑒−𝑗18·0,028𝑒𝑗90 =

= 50150 –j5230 = 50300 𝑒−𝑗8, В

𝐼 = 𝐼

ch 𝛾𝑥 − 𝑈 1к sh 𝛾𝑥 = 1370 𝑒 −𝑗53·1 − 66500

·0,028𝑒𝑗90 = 816,3 + j1104 = 1371 𝑒−𝑗53. А

25 1к

𝑍в

450𝑒−𝑗18

Ток и напряжение для остальных х находим аналогично. Вычисленные значения токов и напряжений при коротком замыкании линии приведены в таблице 3, а построенные по результатам вычислений эпюры распределения токов и напряжений вдоль линии приведены на рисунке 2.

Таблица 3

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| х, км | Режим короткого замыкания | |
| Ток, А | Напряжение, В |
| 0 | 1370 𝑒−𝑗53 | 66500 |
| 25 | 1371 𝑒−𝑗53 | 50300 𝑒−𝑗8 |
| 50 | 1372 𝑒−𝑗53 | 33300 𝑒−𝑗18 |
| 75 | 1373 𝑒−𝑗53 | 14600 𝑒−𝑗10 |
| 100 | 1374 𝑒−𝑗53 | 0 |

По данным расчетов строим эпюры распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии при коротком замыкании (рис. 2).

U, В

70000

60000

50000

40000

30000

20000

10000

I, А

I

**\***\*

\*

\*

\*

\*

1200

800

**\***

**\***

U

400

**\***

**\***

0 20 40 60 80 100 х, км

Рис. 2. Распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии при коротком замыкании

1. Распределение токов и напряжений вдоль линии при согласованной нагрузке, т.е. когда сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению ( 𝑍н = 𝑍в) определяется аналогично режимам холостого хода и короткого замыкания.

Особенность данного режима является то, что в любом сечении линии входное сопротивление её остается постоянным и равным волновому (𝑍вх = 𝑍в). Следовательно входное сопротивление линии в данном режиме равно

𝑍вх = 𝑍в = 450𝑒−𝑗18 . Ом Ток в начале линии, нагруженной на 𝑍н = 𝑍в , будет равен

𝐼 = 𝑈 1 = 115000

= 148 𝑒𝑗18. А

1 𝑍в

√3 · 450𝑒−𝑗13

По уравнениям (2) находим значение напряжения и тока в сечениях, принятых ранее (см. табл. 1).

Например, при х = 25 км имеем:

𝑈 25 = 𝑈 1 ch 𝛾𝑥 − 𝐼1 𝑍в sh 𝛾𝑥 = 66500·1−148 𝑒𝑗18·450𝑒−𝑗18·0,028𝑒𝑗90 =

= 66500 –j1863 = 66500 𝑒−𝑗1, В

𝐼 = 𝐼

ch 𝛾𝑥 − 𝑈 1 sh 𝛾𝑥 = 148𝑒−𝑗18·1 − 66500

·0,028𝑒𝑗90 = 148 𝑒𝑗16. А

25 1

𝑍в

450𝑒−𝑗18

Вычисленные значения токов и напряжений сведены в таблицу 4. На рисунке 3 приведены эпюры распределения действующих значений тока и напряжения вдоль линии, работающей в режиме согласованной нагрузки.

Таблица 4

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| х, км | Режим согласованной нагрузки | |
| Ток, А | Напряжение, В |
| 0 | 148 𝑒𝑗18 | 66500 |
| 25 | 148 𝑒𝑗16 | 66500 𝑒−𝑗1 |
| 50 | 145 𝑒𝑗15 | 66200 𝑒−𝑗2 |
| 75 | 143 𝑒𝑗13 | 64750 𝑒−𝑗4 |
| 100 | 143 𝑒𝑗12 | 66300 𝑒−𝑗6 |

U, В

70000

60000

50000

40000

30000

20000

10000

I

**\***

\*

I, А

\*

\*

120

**\***

\*

**\***

U

**\***

\*

**\***

80

40

0 20 40 60 80 100 х, км

Рис. 3. Распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии при коротком замыкании

1. Определим частоту, при которой в заданной линии будет укладываться одна

четверть волны, т.е. *l =* 𝜆 или λ = 4 *l.*

4

Для этого используем соотношения:

λ = 2𝜋

𝛽

и

𝑣 = 𝜔 = 2𝜋𝑓 = 2𝜋𝑓 = *fλ*

Откуда

ф 𝛽

𝛽 2𝜋

𝜆

*f =* 𝑣ф

𝜆

или при длине волны, равной λ = 4*l* имеем

*f =* 𝑣ф *=*𝑣ф *=* 300·103*=* 732, 1⁄с

𝜆 4𝑙 4·100

где 𝑣ф = 300000 км⁄с – скорость электромагнитной волны в вакууме.

***Примечание: Студенты оформляют отчет с использование для оформления и печати ЭВМ.***

Приложение 2

