

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

**Московский институт электроники и математики им. А.Н.
Тихонова**

Фунштейн Дмитрий Сергеевич, группа БИТ212

Домашняя работа №4
по дисциплине «Теория электрических цепей»

Тема: «Длинные линии»
Вариант: 22

Дата сдачи отчета: 17.12.22

Москва 2022

Входные данные

$R_0=25 \text{ мОм/мкм}$, $L_0=20 \text{ пГн/мкм}$, $C_0=2 \text{ фФ/мкм}$, $g_0=1 \text{ мкСм/мкм}$, $f=1 \text{ ГГц}$, $d=2000 \text{ мкм}$.

Решение

Вычисляем комплексное сопротивление и проводимость на единицу длины линии:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_0 &= R_0 + j\omega L_0 = 25 \cdot \frac{10^{-3}}{10^{-6}} + j \cdot 2\pi \cdot 1 \cdot 10^9 \cdot 20 \cdot \frac{10^{-12}}{10^{-6}} = \\ &= (25 + j125,6) \cdot 10^3 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{м}} \right) \\ \underline{Y}_0 &= g_0 + j\omega C_0 = 1 \cdot \frac{10^{-6}}{10^{-6}} + j \cdot 2\pi \cdot 1 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot \frac{10^{-15}}{10^{-6}} = 1 + j12,56 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{м}} \right)\end{aligned}$$

Вычислим волновое сопротивление и постоянную распространения линии:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_c &= \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{(25 + j125,6) \cdot 10^3}{1 + j12,56}} = 100,64 - 5,89j \\ \gamma &= \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} = \sqrt{(25 + j125,6) \cdot 10^3 \cdot (1 + j12,56)} = \\ &= 174,69 + 1258,19j = (\alpha + j\beta)\end{aligned}$$

Определим характер волнового сопротивления:

$$\begin{aligned}\text{Im}(\underline{Z}_c) &= -5,89 < 0, \Rightarrow \text{сопротивление имеет индуктивный характер.} \\ C_c &= \frac{1}{\omega \cdot \text{Im}(\underline{Z}_c)} = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^9 \cdot 5,89} = 2,702 \cdot 10^{-11} (\text{Ф})\end{aligned}$$

Вычислим фазовую скорость и длину волны линии:

$$\begin{aligned}V &= \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi \cdot 1 \cdot 10^9}{492,023} = 12,77 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right) \\ \lambda &= \frac{2\pi}{\beta} = \frac{V}{f} = \frac{12,77 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^9} = 12,77 \cdot 10^{-3} (\text{м})\end{aligned}$$

Вычислим параметры секции, при количестве секций $n = 10$:

$$R_M = \frac{R_0 \cdot d}{n} = \frac{25 \cdot 10^{-3} \cdot 2000 \cdot 10^{-6}}{10^{-6} \cdot 10} = 5(\text{Ом})$$

$$L_M = \frac{L_0 \cdot d}{n} = \frac{20 \cdot 10^{-12} \cdot 2000 \cdot 10^{-6}}{10^{-6} \cdot 10} = 4 \cdot 10^{-9}(\text{Гн})$$

$$C_M = \frac{C_0 \cdot d}{n} = \frac{2 \cdot 10^{-15} \cdot 2000 \cdot 10^{-6}}{10^{-6} \cdot 10} = 4 \cdot 10^{-13}(\text{Ф})$$

$$g_M = \frac{g_0 \cdot d}{n} = \frac{1 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 \cdot 10^{-6}}{10^{-6} \cdot 10} = 2 \cdot 10^{-4}(\text{См})$$

$$R_g = \frac{1}{g_M} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-4}} = 0,5 \cdot 10^4(\text{Ом})$$

1. Создадим .cir файл описания схемы и рассчитаем распределение напряжения и тока вдоль линии при согласованной нагрузке. По полученным результатам построим графики распределения амплитуд и фаз напряжения и тока вдоль линии. В дальнейшем в .cir файле будет меняться только RL и CL. Графики в конце.



7.cir

1. Согласованная нагрузка

V 1 0 AC=1V

R1 1 2 1n

R2 3 4 1n

R3 5 6 1n

R4 7 8 1n

R5 9 10 1n

R6 11 12 1n

R7 13 14 1n

R8 15 16 1n

R9 17 18 1n

R10 19 20 1n

RL 21 22 100.64

CL 22 0 27.02p

X1 2 0 3 TLINE

X2 4 0 5 TLINE

X3 6 0 7 TLINE

X4 8 0 9 TLINE

X5 10 0 11 TLINE

X6 12 0 13 TLINE

X7 14 0 15 TLINE

X8 16 0 17 TLINE

X9 18 0 19 TLINE

X10 20 0 21 TLINE

.subckt TLINE 1 2 6

R 1 3 2.5

R1 4 5 2.5

L 3 4 2n

L1 5 6 2n

Rg 4 2 5k

C 4 2 400f

.ends

.AC LIN 1 1g 1g

.PRINT AC I(R1) I(R2) I(R3) I(R4) I(R5) I(R6) I(R7) I(R8) I(R9) I(R10) I(RL)

.PRINT AC V(2) V(4) V(6) V(8) V(10) V(12) V(14) V(16) V(18) V(20) V(21)

--- AC Analysis ---

frequency:	1e+009	Hz		
V(2):	mag:	1	phase: -3.02991e-011°	voltage
V(4):	mag:	0.964508	phase: -14.4329°	voltage
V(6):	mag:	0.930087	phase: -28.8946°	voltage
V(8):	mag:	0.896958	phase: -43.3896°	voltage
V(10):	mag:	0.865328	phase: -57.9138°	voltage
V(12):	mag:	0.835325	phase: -72.4544°	voltage
V(14):	mag:	0.806946	phase: -86.9919°	voltage
V(16):	mag:	0.780038	phase: -101.505°	voltage
V(18):	mag:	0.754318	phase: -115.976°	voltage
V(20):	mag:	0.729431	phase: -130.395°	voltage
V(21):	mag:	0.705028	phase: -144.768°	voltage
I(R1):	mag:	0.00699348	phase: -141.418°	device_current
I(R10):	mag:	0.00725304	phase: -126.868°	device_current
I(R9):	mag:	0.00752588	phase: -112.365°	device_current
I(R8):	mag:	0.00780897	phase: -97.9142°	device_current
I(R7):	mag:	0.00809944	phase: -83.5047°	device_current
I(R6):	mag:	0.00839552	phase: -69.1199°	device_current
I(R5):	mag:	0.00869581	phase: -54.7369°	device_current
I(R4):	mag:	0.00900152	phase: -40.3382°	device_current
I(R3):	mag:	0.00931453	phase: -25.9108°	device_current
I(R2):	mag:	0.0096377	phase: -11.4502°	device_current
I(R1):	mag:	0.00997417	phase: 3.03918°	device_current

2. Рассчитаем распределение напряжения и тока вдоль линии при холостом ходе. По полученным результатам построим графики распределения амплитуд и фаз напряжения и тока вдоль линии.

```
8.cir
2. Холостой ход
V 1 0 AC=1V
R1 1 2 1n
R2 3 4 1n
R3 5 6 1n
R4 7 8 1n
R5 9 10 1n
R6 11 12 1n
R7 13 14 1n
R8 15 16 1n
R9 17 18 1n
R10 19 20 1n
RL 21 0 1G
*CL 22 0 27.02p
X1 2 0 3 TLINE
X2 4 0 5 TLINE
X3 6 0 7 TLINE
X4 8 0 9 TLINE
X5 10 0 11 TLINE
X6 12 0 13 TLINE
X7 14 0 15 TLINE
X8 16 0 17 TLINE
X9 18 0 19 TLINE
X10 20 0 21 TLINE
.subckt TLINE 1 2 6
R 1 3 2.5
R1 4 5 2.5
L 3 4 2n
L1 5 6 2n
Rg 4 2 5k
C 4 2 400f
.ends
.AC LIN 1 1g 1g
.PRINT AC I(R1) I(R2) I(R3) I(R4) I(R5) I(R6) I(R7) I(R8) I(R9) I(R10) I(RL)
.PRINT AC V(2) V(4) V(6) V(8) V(10) V(12) V(14) V(16) V(18) V(20) V(21)
```

--- AC Analysis ---				
frequency:	1e+009	Hz		
V(2):	mag: 1	phase: 3.24538e-010°		voltage
V(4):	mag: 0.809066	phase: -6.47142°		voltage
V(6):	mag: 0.582591	phase: -16.2024°		voltage
V(8):	mag: 0.354853	phase: -37.0869°		voltage
V(10):	mag: 0.247229	phase: -91.6541°		voltage
V(12):	mag: 0.394752	phase: -137.826°		voltage
V(14):	mag: 0.618005	phase: -153.929°		voltage
V(16):	mag: 0.824248	phase: -160.8°		voltage
V(18):	mag: 0.985485	phase: -164.258°		voltage
V(20):	mag: 1.08744	phase: -165.963°		voltage
V(21):	mag: 1.12228	phase: -166.483°		voltage
I(R1):	mag: 1.12228e-009	phase: -166.483°		device_current
I(R10):	mag: 0.00282951	phase: -81.0339°		device_current
I(R9):	mag: 0.00548336	phase: -80.5149°		device_current
I(R8):	mag: 0.00779738	phase: -79.6169°		device_current
I(R7):	mag: 0.00962994	phase: -78.2882°		device_current
I(R6):	mag: 0.0108716	phase: -76.4423°		device_current
I(R5):	mag: 0.0114534	phase: -73.9325°		device_current
I(R4):	mag: 0.0113539	phase: -70.5111°		device_current
I(R3):	mag: 0.0106058	phase: -65.7331°		device_current
I(R2):	mag: 0.0093069	phase: -58.7462°		device_current
I(R1):	mag: 0.00764778	phase: -47.786°		device_current

3. Рассчитаем распределение напряжения и тока вдоль линии при холостом ходе. По полученным результатам построим графики распределения амплитуд и фаз напряжения и тока вдоль линии.

```
9.cir
3. Короткое замыкание
V 1 0 AC=1V
R1 1 2 1n
R2 3 4 1n
R3 5 6 1n
R4 7 8 1n
R5 9 10 1n
R6 11 12 1n
R7 13 14 1n
R8 15 16 1n
R9 17 18 1n
R10 19 20 1n
RL 21 0 1n
*CL 22 0 27.02p
X1 2 0 3 TLINE
X2 4 0 5 TLINE
X3 6 0 7 TLINE
X4 8 0 9 TLINE
X5 10 0 11 TLINE
X6 12 0 13 TLINE
X7 14 0 15 TLINE
X8 16 0 17 TLINE
X9 18 0 19 TLINE
X10 20 0 21 TLINE
.subckt TLINE 1 2 6
R 1 3 2.5
R1 4 5 2.5
L 3 4 2n
L1 5 6 2n
Rg 4 2 5k
C 4 2 400f
.ends
.AC LIN 1 1g 1g
.PRINT AC I(R1) I(R2) I(R3) I(R4) I(R5) I(R6) I(R7) I(R8) I(R9) I(R10) I(RL)
.PRINT AC V(2) V(4) V(6) V(8) V(10) V(12) V(14) V(16) V(18) V(20) V(21)
```


--- AC Analysis ---				
frequency:	1e+009	Hz		
V(2) :	mag:	1	phase: -6.07563e-010°	voltage
V(4) :	mag:	1.21695	phase: -10.9596°	voltage
V(6) :	mag:	1.38679	phase: -17.947°	voltage
V(8) :	mag:	1.48461	phase: -22.7242°	voltage
V(10) :	mag:	1.49763	phase: -26.1452°	voltage
V(12) :	mag:	1.42155	phase: -28.6545°	voltage
V(14) :	mag:	1.2592	phase: -30.4999°	voltage
V(16) :	mag:	1.01957	phase: -31.8276°	voltage
V(18) :	mag:	0.716994	phase: -32.7253°	voltage
V(20) :	mag:	0.369982	phase: -33.2456°	voltage
V(21) :	mag:	1.46657e-011	phase: -112.245°	voltage
I(R1) :	mag:	0.0146657	phase: -112.245°	device_current
I(R10) :	mag:	0.0142104	phase: -111.725°	device_current
I(R9) :	mag:	0.0128781	phase: -110.02°	device_current
I(R8) :	mag:	0.0107711	phase: -106.563°	device_current
I(R7) :	mag:	0.00807572	phase: -99.6937°	device_current
I(R6) :	mag:	0.00515824	phase: -83.5913°	device_current
I(R5) :	mag:	0.00323045	phase: -37.4173°	device_current
I(R4) :	mag:	0.00463693	phase: 17.1534°	device_current
I(R3) :	mag:	0.00761307	phase: 38.0377°	device_current
I(R2) :	mag:	0.0105725	phase: 47.7686°	device_current
I(R1) :	mag:	0.0130677	phase: 54.2393°	device_current

4. Рассчитаем распределение напряжения и тока вдоль линии при активной нагрузке, равной удвоенной действительной части характеристического сопротивления. По полученным результатам построим графики распределения амплитуд и фаз напряжения и тока вдоль линии.



10.cir

4. Активная нагрузка

V 1 0 AC=1V

R1 1 2 1n

R2 3 4 1n

R3 5 6 1n

R4 7 8 1n

R5 9 10 1n

R6 11 12 1n

R7 13 14 1n

R8 15 16 1n

R9 17 18 1n

R10 19 20 1n

RL 21 0 200

*CL 22 0 27.02p

X1 2 0 3 TLINE

X2 4 0 5 TLINE

X3 6 0 7 TLINE

X4 8 0 9 TLINE

X5 10 0 11 TLINE

X6 12 0 13 TLINE

X7 14 0 15 TLINE

X8 16 0 17 TLINE

X9 18 0 19 TLINE

X10 20 0 21 TLINE

.subckt TLINE 1 2 6

R 1 3 2.5

R1 4 5 2.5

L 3 4 2n

L1 5 6 2n

Rg 4 2 5k

C 4 2 400f

.ends

.AC LIN 1 1g 1g

.PRINT AC I(R1) I(R2) I(R3) I(R4) I(R5) I(R6) I(R7) I(R8) I(R9) I(R10) I(RL)

.PRINT AC V(2) V(4) V(6) V(8) V(10) V(12) V(14) V(16) V(18) V(20) V(21)

--- AC Analysis ---

frequency:	1e+009	Hz	
V(2):	mag: 1	phase: 1.36012e-010°	voltage
V(4):	mag: 0.890079	phase: -12.977°	voltage
V(6):	mag: 0.778902	phase: -28.534°	voltage
V(8):	mag: 0.689652	phase: -47.5765°	voltage
V(10):	mag: 0.647106	phase: -69.5367°	voltage
V(12):	mag: 0.661984	phase: -91.3999°	voltage
V(14):	mag: 0.719762	phase: -109.979°	voltage
V(16):	mag: 0.792494	phase: -124.466°	voltage
V(18):	mag: 0.855136	phase: -135.667°	voltage
V(20):	mag: 0.890611	phase: -144.639°	voltage
V(21):	mag: 0.889008	phase: -152.246°	voltage
I(R1):	mag: 0.00444504	phase: -152.246°	device_current
I(R10):	mag: 0.00502812	phase: -125.364°	device_current
I(R9):	mag: 0.00614801	phase: -105.408°	device_current
I(R8):	mag: 0.0074155	phase: -91.1671°	device_current
I(R7):	mag: 0.00856984	phase: -80.1136°	device_current
I(R6):	mag: 0.00946075	phase: -70.5463°	device_current
I(R5):	mag: 0.01001	phase: -61.4017°	device_current
I(R4):	mag: 0.0101964	phase: -51.9192°	device_current
I(R3):	mag: 0.0100534	phase: -41.4401°	device_current
I(R2):	mag: 0.0096711	phase: -29.3155°	device_current
I(R1):	mag: 0.00919945	phase: -14.954°	device_current

Графики