

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет
Высшая школа экономики»**

Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова
Департамент электронной инженерии

ОТЧЕТ
по домашней работе № 1
по дисциплине
«Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей»

Выполнила студентка БИТ231
Байздренко В.М.

Преподаватель:
Саматов М.Р.

Москва, 2025

Оглавление

Задание 1.	5
Задание 2.	7
Задание 3.	7
Задание 4.1. ВЧ сигнал ($G=0$).....	7
Задание 4.2. ВЧ импульс ($G=0$).....	12
Задание 4.3. НЧ импульс ($G=10$).	17
Задание 4.4. НЧ+ВЧ импульс ($G=10$).....	20
Задание 4.5. ШП импульс ($G=0$).....	22
Ответы на контрольные вопросы	24
Код	27

Для дискретной модели линии передачи:

1. Привести эквивалентную схему линии передачи, основные выражения для расчета ее параметров и уравнения возбуждения.
2. Рассчитать параметры эквивалентной схемы отдельной ячейки: L , C_1 , C_2 (для исходных данных, указанных в п. 4). Наименования параметров, используемых в программе, и их назначение приведены в таблице 1.
3. Построить зависимость фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления эквивалентной линии от частоты (рассчитываются для каждого случая, кроме пункта с ШП импульсом).
4. Для заданных в соответствии с номером варианта N (N – порядковый номер в списке группы; см. ведомость по данной дисциплине) параметров линии передачи:
 - Нижняя граничная частота: $f_l = N$
 - Верхняя граничная частота: $f_h = 10 * (N + 1)$
 - Опорная частота: $f_0 = 0.5 * (f_h + f_l)$
 - Волновое сопротивление: $Z_0 = 10N$

и для различных возбуждающих сигналов получить зависимости входных и выходных напряжений от времени, их спектры и распределения напряжений вдоль линии передачи в зависимости от номера ячейки.

4.1. ВЧ сигнал ($G = 0$):

- а) частота сигнала равна опорной частоте ЛП; условие согласования сопротивлений выполняется; $N_c = 10$
- б) частота сигнала меньше нижней граничной частоты ЛП; условие согласования сопротивлений выполняется; $N_c = 10$
- в) частота сигнала больше верхней граничной частоты ЛП; условие согласования сопротивлений выполняется; $N_c = 10$
- г) частота сигнала равна опорной частоте ЛП; режим стоячей волны; $N_c = 10$

4.2. ВЧ импульс ($G = 0$):

- а) частота ВЧ импульса равна опорной частоте; условие согласование сопротивлений выполняется; $N_c = 10$
- б) частота ВЧ импульса равна опорной частоте; условие согласование сопротивлений выполняется; $N_c = 100$
- в) частота ВЧ импульса $f_c = 0.95 f_h$; условие согласование сопротивлений выполняется; $N_c = 10$
- г) частота ВЧ импульса равна опорной частоте; условие согласование сопротивлений не выполняется; $N_c = 10$

4.3. НЧ импульс ($G = 10$):

- а) условие согласования сопротивлений выполняется; $N_c = 500$
 - б) $K_0 = KN = 10$; $N_c = 500$
 - в) $K_0 = KN = 0.1$; $N_c = 500$
- 4.4. НЧ + ВЧ импульс ($G = 10$):
- а) частота ВЧ импульса равна опорной частоте ЛП; условие согласования сопротивлений выполняется; $N_c = 500$
 - б) $f_c = 0.95 f_h$; условие согласования сопротивлений выполняется; $G = 10$; $N_c = 500$
- 4.5. ШП импульс ($G = 0$):
- а) верхняя частота ШП импульса = $0.95 f_h$; нижняя частота ШП импульса = $1.2 f_l$; условие согласования сопротивлений выполняется; $N_c = 10$
 - б) верхняя частота ШП импульса = $0.95 f_h$; нижняя частота ШП импульса = $1.2 f_l$; условие согласования сопротивлений не выполняется; $N_c = 20$

Задание 1.

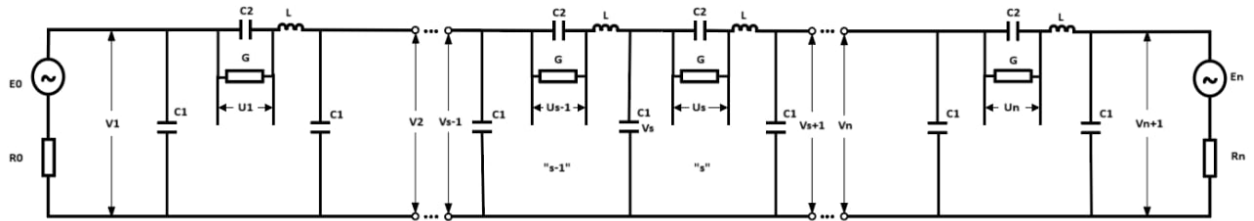


Рисунок 1.1. Общая эквивалентная схема дискретной модели линии передачи

На рисунке 1.1 представлена дискретная модель линии передачи, которая используется для анализа и описания процесса распространения электромагнитных волн по линиям связи, таким как кабели или линии передач. Эта модель основана на принципах теории цепей и позволяет анализировать поведение сигнала вдоль линии с учетом таких факторов, как индуктивность, емкость, сопротивление и потери.

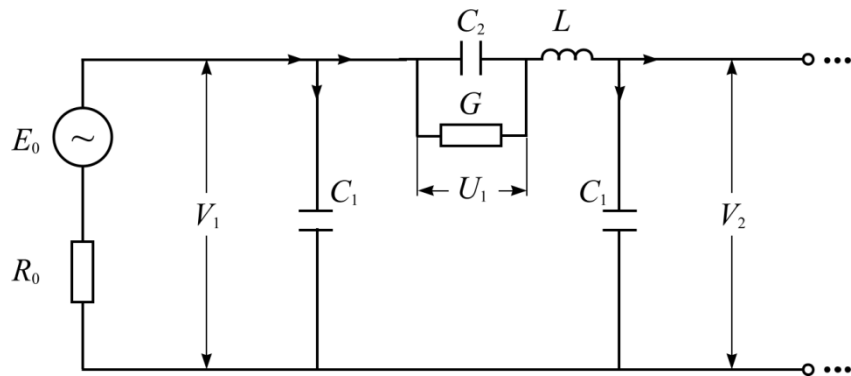


Рисунок 1.2. Эквивалентная схема входного звена дискретной модели линии передачи.

Расчет граничных условий входного звена (рисунок 1.2):

$$\frac{d^2 V_1}{dt^2} = \frac{1}{LC_1} (V_2 - V_1 + U_1) + \frac{1}{R_0 C_1} \frac{d}{dt} (E_0 - V_1)$$

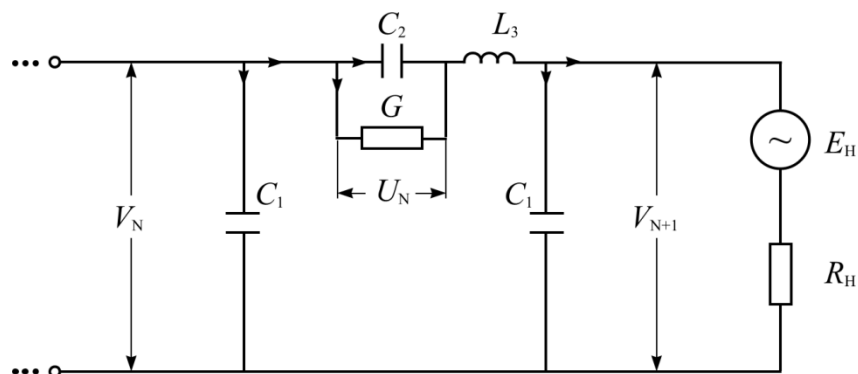


Рисунок 1.3. Эквивалентная схема выходного звена дискретной модели линии передачи.

Расчет граничных условий выходного звена (рисунок 1.3):

$$\frac{d^2 V_{N+1}}{dt^2} = \frac{1}{LC_1} (V_N - V_{N+1} - U_N) + \frac{1}{R_H C_1} \frac{d}{dt} (E_H - V_{N+1})$$

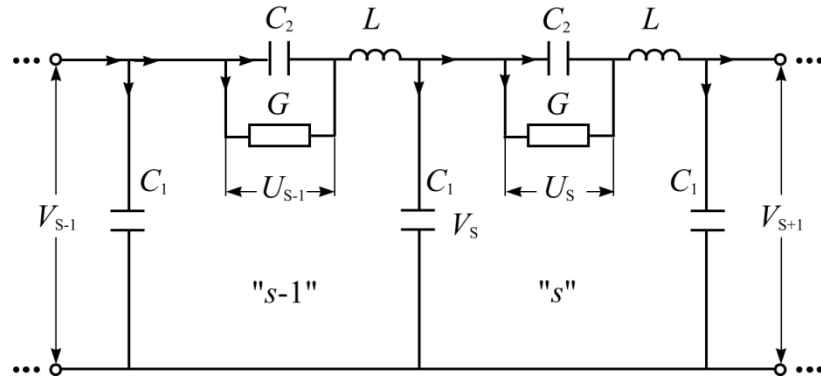


Рисунок 1.4. Эквивалентная схема двух соседних звеньев дискретной модели линии передачи.

Уравнения, связывающие напряжения в соседних ячейках:

$$\frac{d^2 V_s}{dt^2} = \frac{1}{LC_1} (V_{s-1} - 2V_s + V_{s+1} + U_s - U_{s-1})$$

$$\frac{d^2 U_s}{dt^2} = \frac{1}{LC_2} (V_s - V_{s+1} - U_s) - \frac{G}{C_2} \frac{dU_s}{dt}$$

Для расчета параметров отдельной ячейки представим схему на рисунке 1.5 как схему на рисунке 1.6.

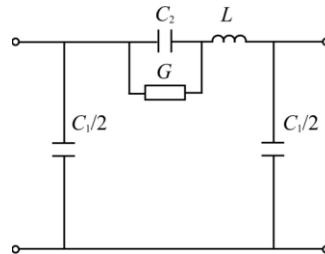


Рисунок 1.5. Эквивалентная схема одной ячейки дискретной модели линии передачи.

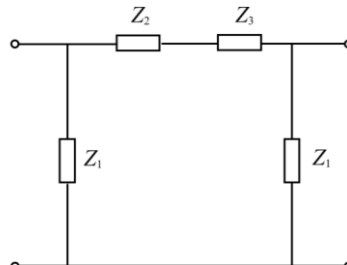


Рисунок 1.6. Упрощенная схема одной ячейки.

Формулы для расчета параметров эквивалентной схемы одной ячейки:

$$L = \sqrt{\frac{Z_0^2(f_0)\omega_0^2(2\omega_B^2 - \omega_H^2 - \omega_0^2)}{(\omega_B^2 - \omega_H^2)^2 \cdot (\omega_0^2 - \omega_H^2)}}$$

$$C_1 = \frac{2}{L(\omega_B^2 - \omega_H^2)}$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_H^2 L}$$

$$Z_0(f) = \sqrt{\frac{L^2(\omega_B^2 - \omega_H^2)^2 \cdot (\omega^2 - \omega_H^2)}{\omega^2(2\omega_B^2 - \omega_H^2 - \omega^2)}}$$

Задание 2.

Вычислим параметры в соответствии с вариантом:

- Нижняя граничная частота: $f_l = N = 2$
- Верхняя граничная частота: $f_h = 10 * (N + 1) = 30$
- Опорная частота: $f_0 = 0.5 * (f_h + f_l) = 16$
- Волновое сопротивление: $Z_0 = 10N = 20$

Перенесем все ранее написанные формулы в код на python, после чего вычислим с помощью него параметры эквивалентной схемы отдельной ячейки. Таким образом получим, что:

$$L = 0.140515 \text{ Гн}$$

$$C_1 = 0.000402 \text{ Ф}$$

$$C_2 = 0.045067 \text{ Ф}$$

Задание 3.

См. рисунки 2.1 – 6.2.

Задание 4.1. ВЧ сигнал (G=0).

а) $f_c = f_0 = 16$; $K_0 = K_N = 1$; $N_c = 10$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: ВЧ сигнал

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 16 Гц

Проводимость G : 0 1/Ом
 Согласование слева K_0 : 1.0
 Согласование справа K_N : 1.0
 Временной интервал T_s : 4 с
 Число ячеек в ЛП N_s : 10

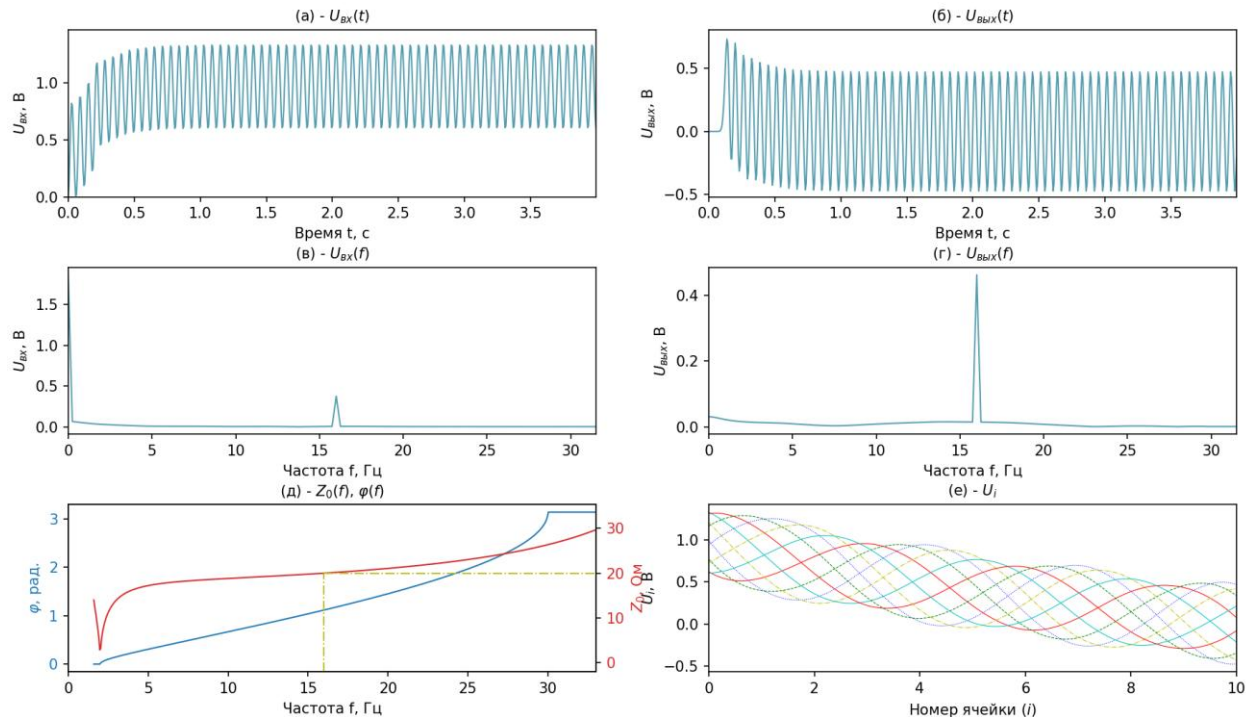


Рис. 2.1. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 2.1 (а) показана зависимость входного напряжения ВЧ сигнала с частотой, равной опорной, от времени. Его амплитуда остается постоянной, так как затухание отсутствует, а условие согласования сопротивлений выполняется. На рисунке 2.1 (б) показана зависимость выходного напряжения от времени. Амплитуды входного и выходного сигнала равны. На рисунке 2.1 (в) и 2.1 (г) показаны спектры входного и выходного сигнала. На них отмечена одинаковая доминирующая частота 16 Гц, а амплитуды приблизительно равны (отличается масштаб), что означает отсутствие искажений. На рисунке 2.1 (д) изображены зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты. Видно, что волновое сопротивление достигает значения Z_0 при частоте f_0 . На рисунке 2.1 (е) показано распределение напряжений по ячейкам. Напряжения распределены равномерно по ячейкам линии передачи, что указывает на отсутствие отражений и режим бегущей волны. Это является следствием согласования импедансов.

б) $f_c < f_l = 2$; $K_0 = K_N = 1$; $N_c = 10$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: ВЧ сигнал

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 1 Гц

Проводимость G : 0 1/Ом

Согласование слева K_0 : 1.0

Согласование справа K_N : 1.0

Временной интервал T_c : 4 с

Число ячеек в ЛП N_c : 10

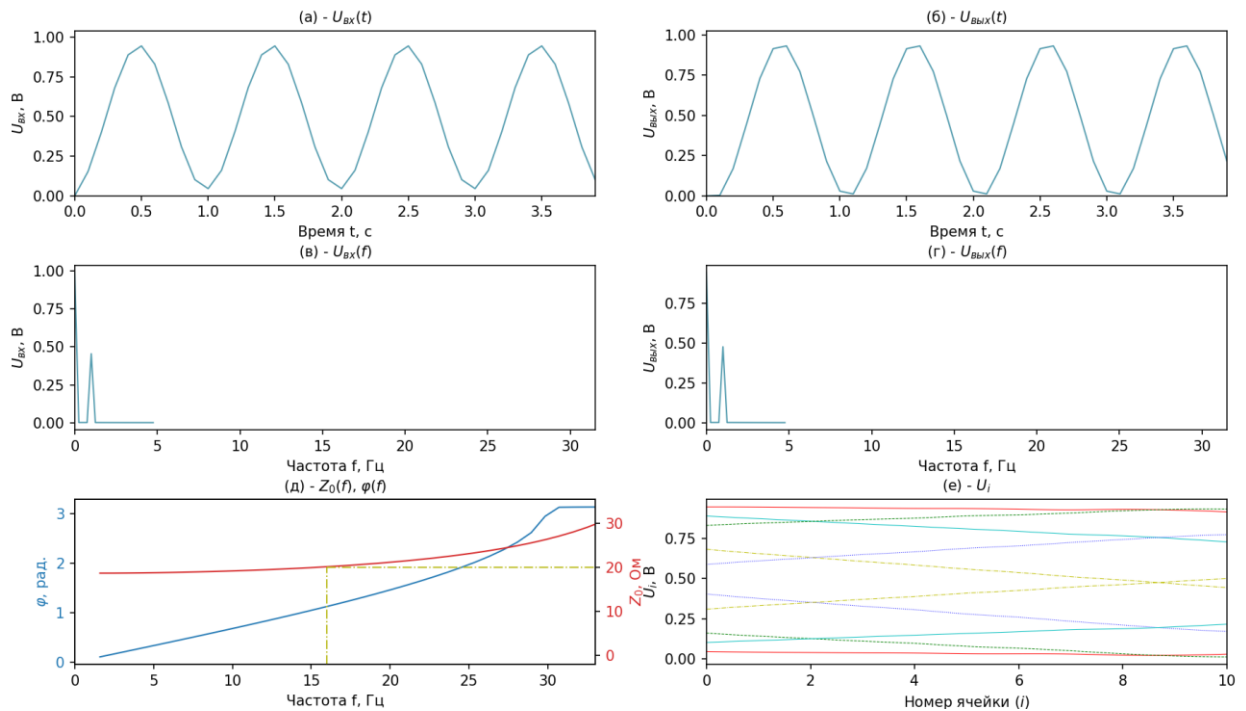


Рис. 2.2. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 2.2 (а) показана зависимость входного напряжения ВЧ сигнала с частотой меньше нижней граничной от времени. Его амплитуда остается постоянной, так как затухание отсутствует, а условие согласования сопротивлений выполняется. На рисунке 2.2 (б) показана зависимость выходного напряжения от времени. Амплитуды входного и выходного

сигнала не отличаются. На рисунке 2.2 (в) и 2.2 (г) показаны спектры входного и выходного сигнала. На них отмечена одинаковая доминирующая частота 1 Гц, но заметно, что линия спектра прерывается на значении около 4-5 Гц. На рисунке 2.2 (д) изображены зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты. На рисунке 2.2 (е) показано распределение напряжений по ячейкам.

в) $f_c > f_h = 30$; $K_0 = K_N = 1$; $N_c = 10$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: ВЧ сигнал

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 40 Гц

Проводимость G : 0 1/Ом

Согласование слева K_0 : 1.0

Согласование справа K_N : 1.0

Временной интервал T_c : 4 с

Число ячеек в ЛП N_c : 10

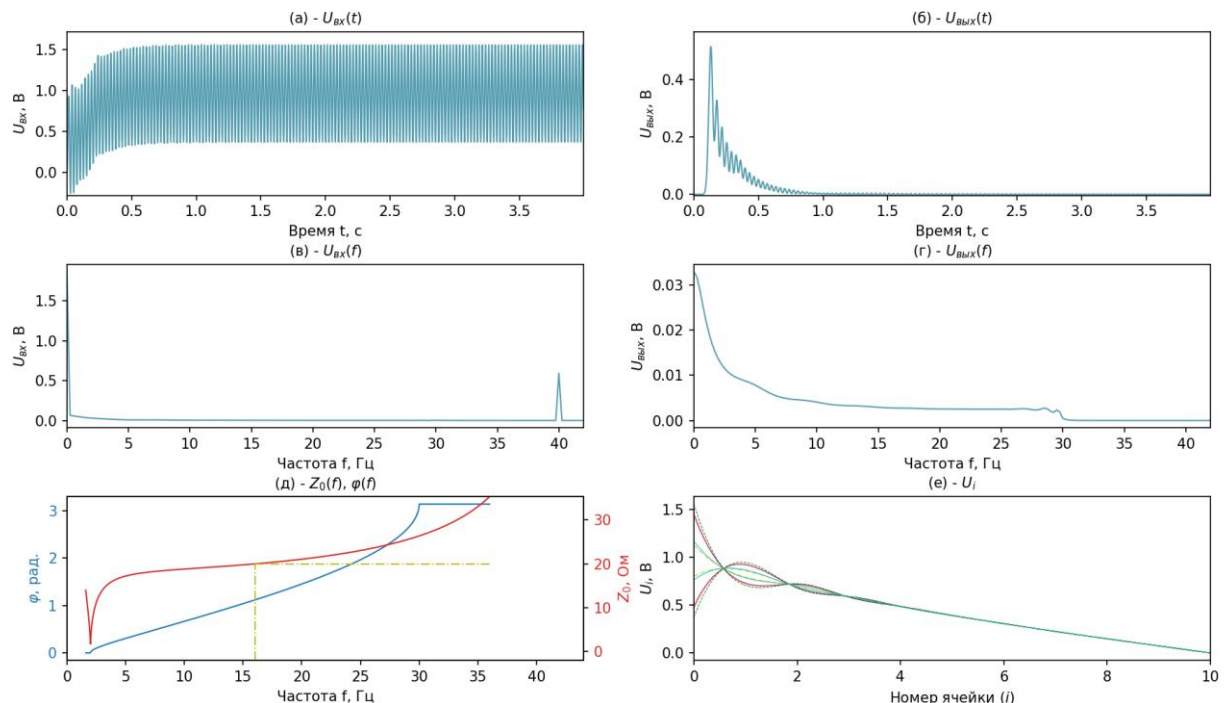


Рис. 2.3. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения

напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 2.3 (а) показана зависимость входного напряжения ВЧ сигнала с частотой выше верхней граничной от времени. Его амплитуда остается постоянной, так как затухание отсутствует, а условие согласования сопротивлений выполняется. На рисунке 2.3 (б) показана зависимость выходного напряжения от времени. Оно значительно искажено, так как амплитуда резко уменьшается. На рисунке 2.3 (в) и 2.3 (г) показаны спектры входного и выходного сигнала. На спектре входного сигнала видна доминирующая частота 40 Гц, но эта частота отсутствует на спектре выходного сигнала. На рисунке 2.3 (д) изображены зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты. На рисунке 2.3 (е) показано неравномерное распределение напряжений по ячейкам., что указывает на наличие отражений или несогласований импедансов.

$$г) f_c = f_0 = 16; K_0 = K_N = 10; N_c = 10$$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: ВЧ сигнал

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 16 Гц

Проводимость G : 0 1/Ом

Согласование слева K_0 : 10.0

Согласование справа K_N : 10.0

Временной интервал T_c : 4 с

Число ячеек в ЛП N_c : 10

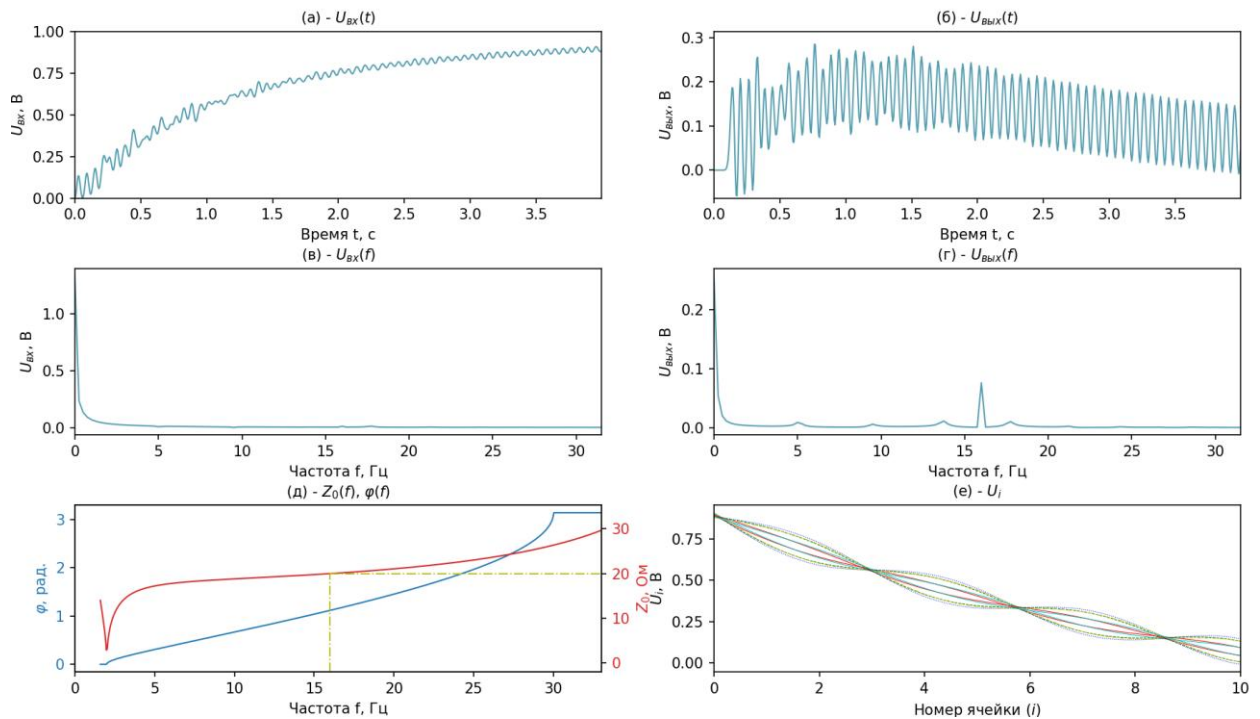


Рис. 2.4. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 2.4 (а) показана зависимость входного напряжения ВЧ сигнала с частотой, равной опорной, от времени. На рисунке 2.4 (б) показана зависимость выходного напряжения от времени. На рисунке 2.4 (в) и 2.4 (г) показаны спектры входного и выходного сигнала. На обоих сигналах доминирующей частотой является 16 Гц (на спектре входного сигнала почти не видно, но она есть), но график выходного напряжения содержит множество дополнительных гармоник. На рисунке 2.4 (д) изображены зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты. На рисунке 2.4 (е) показано неравномерное распределение напряжений по ячейкам, которое указывает на режим стоячей волны.

Задание 4.2. ВЧ импульс ($G=0$).

а) $f_c = f_0 = 16$; $K_0 = K_N = 1$; $N_c = 10$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: ВЧ импульс

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 16 Гц

Проводимость G : 0 1/Ом
 Согласование слева K_0 : 1.0
 Согласование справа K_N : 1.0
 Временной интервал T_s : 4 с
 Число ячеек в ЛП N_s : 10

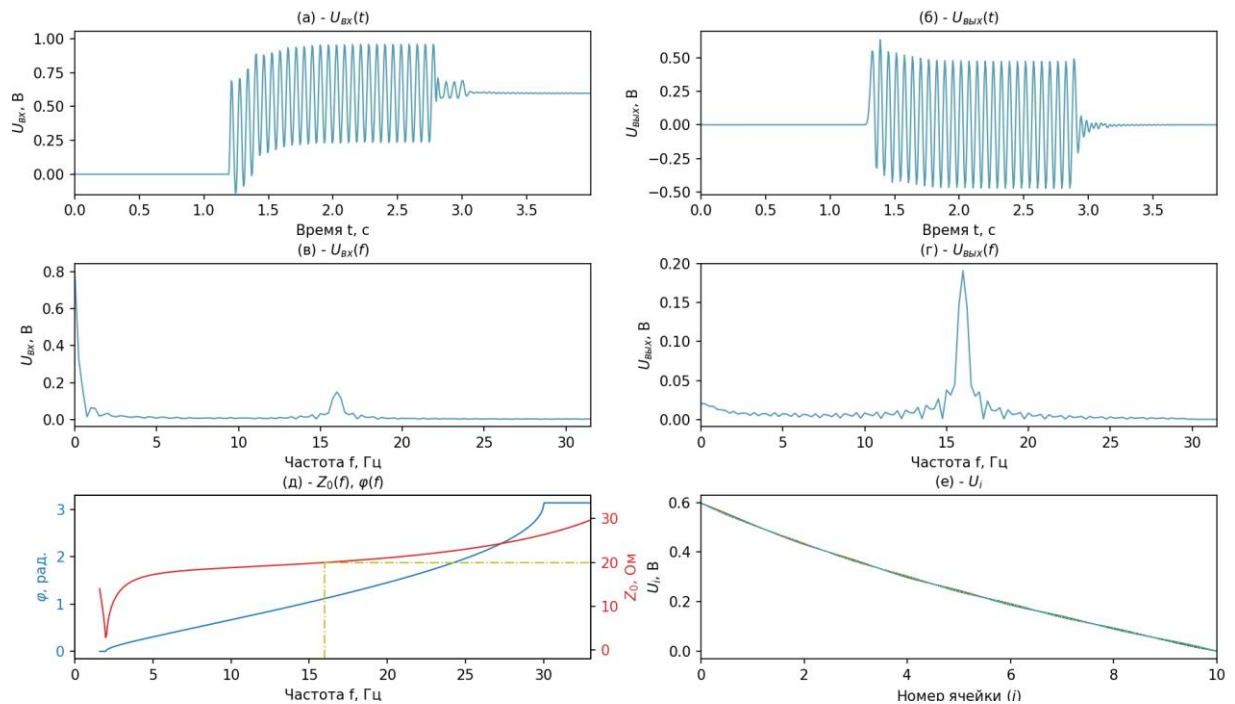


Рис. 3.1. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 3.1 (а) показана зависимость входного напряжения ВЧ импульса с частотой, равной опорной, от времени. Амплитуда сигнала остается постоянной, так как затухание отсутствует, а условие согласования сопротивлений выполняется. На рисунке 3.1 (б) показана зависимость выходного напряжения от времени. На рисунке 3.1 (в) и 3.1 (г) показаны спектры входного и выходного сигнала. На обоих сигналах доминирующей частотой является 16 Гц, по амплитуде графики также равны (но опять же, отличаются масштабом). На рисунке 3.1 (д) изображены зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты. На рисунке 3.1 (е) показано равномерное распределение напряжений по ячейкам, которое указывает на режим бегущей волны.

б) $f_c = f_0 = 16$; $K_0 = K_N = 1$; $N_c = 100$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: ВЧ импульс

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 16 Гц

Проводимость G : 0 1/Ом

Согласование слева K_0 : 1.0

Согласование справа K_N : 1.0

Временной интервал T_c : 4 с

Число ячеек в ЛП N_c : 100

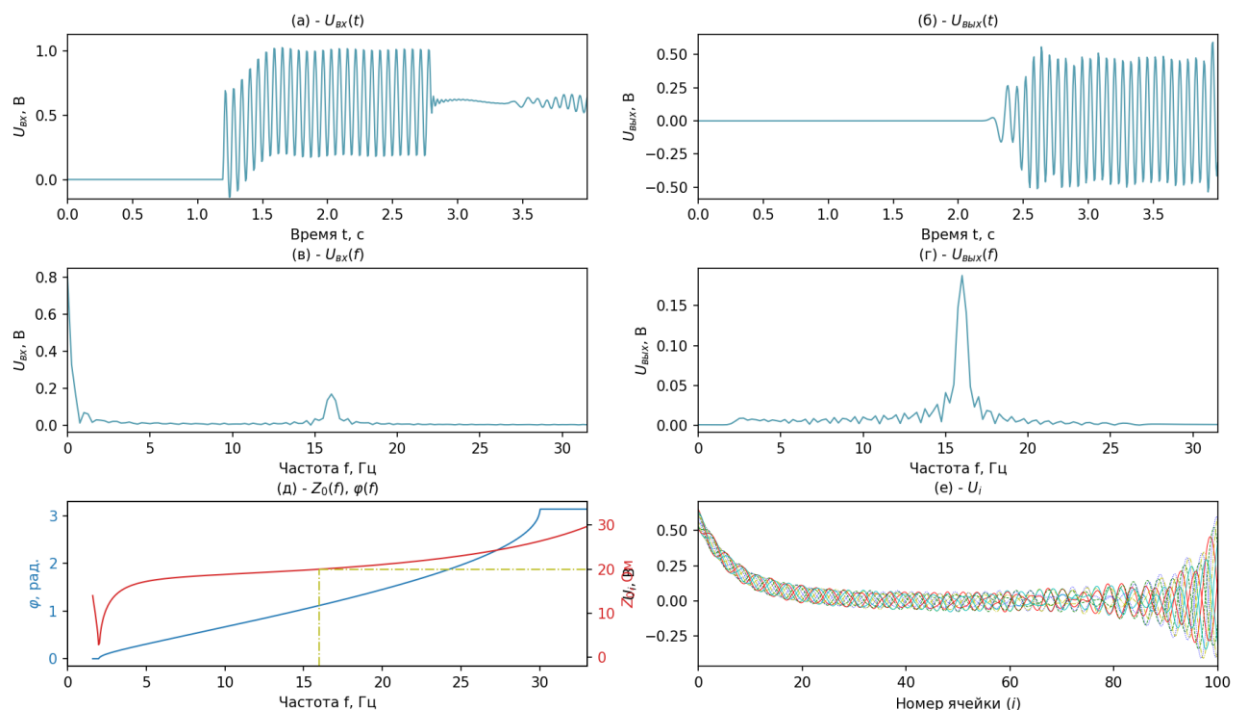


Рис. 3.2. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 3.2 (а) показана зависимость входного напряжения ВЧ импульса с частотой, равной опорной, от времени. На рисунке 3.2 (б) показана зависимость выходного напряжения от времени. Видно, что импульс на выходном сигнале отстает от импульса на входном графике. На рисунке 3.2 (в) и 3.2 (г) показаны спектры входного и выходного сигнала. На обоих сигналах доминирующей частотой является 16 Гц, по амплитуде графики также равны (но опять же, отличаются масштабом). На рисунке 3.2

(д) изображены зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты. На рисунке 3.2 (е) показано неравномерное распределение напряжений по ячейкам.

в) $f_c = 0.95f_h = 0.95 * 30 = 28.5$; $K_0 = K_N = 1$; $N_c = 10$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: ВЧ импульс

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 28.5 Гц

Проводимость G : 0 1/Ом

Согласование слева K_0 : 1.0

Согласование справа K_N : 1.0

Временной интервал T_c : 4 с

Число ячеек в ЛП N_c : 10

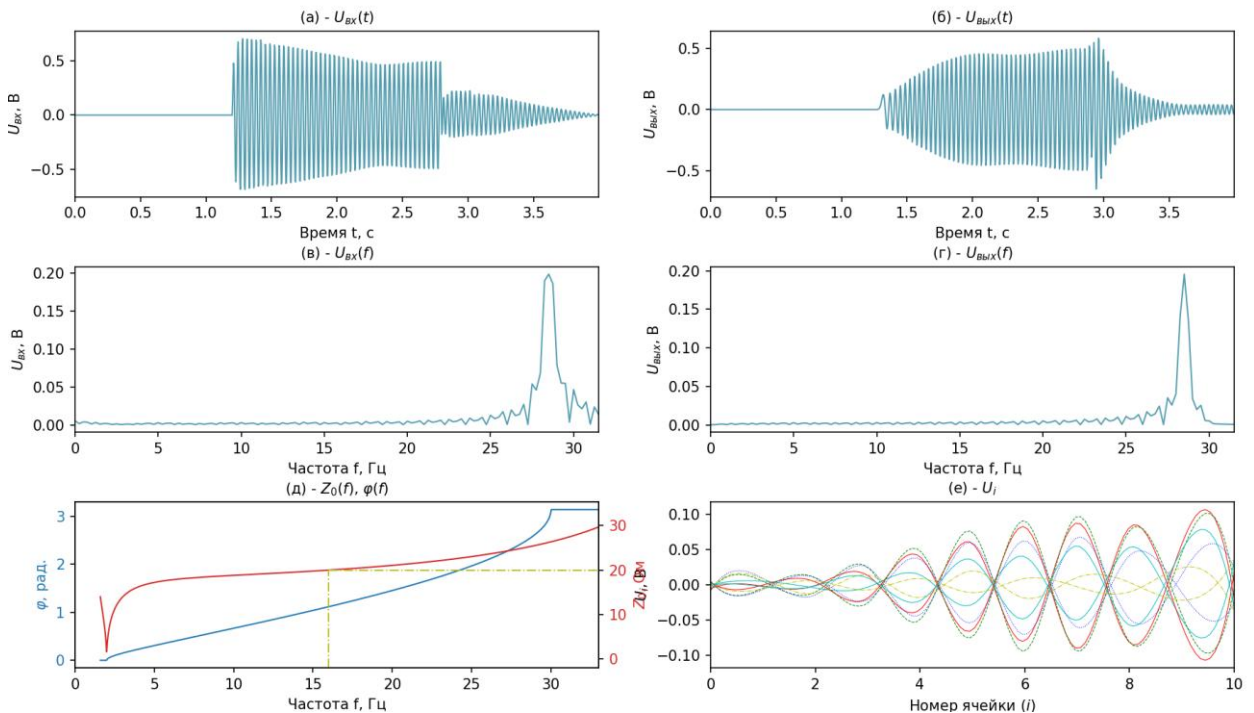


Рис. 3.3. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 3.3 (а) показана зависимость входного напряжения ВЧ импульса с частотой, равной 28.5 Гц, от времени. Амплитуда сигнала

непостоянна. На рисунке 3.3 (б) показана зависимость выходного напряжения от времени, она заметно отличается от зависимости входного напряжения. На рисунке 3.1 (в) и 3.1 (г) показаны спектры входного и выходного сигнала. На обоих сигналах доминирующей частотой является 28.5 Гц, по амплитуде графики также равны. На рисунке 3.1 (д) изображены зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты. На рисунке 3.1 (е) показано неравномерное распределение напряжений по ячейкам.

$$\text{г) } f_c = f_0 = 16; K_0 = 2, K_N = 5; N_c = 10$$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: ВЧ импульс

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 16 Гц

Проводимость G : 0 1/Ом

Согласование слева K_0 : 2.0

Согласование справа K_N : 5.0

Временной интервал T_c : 4 с

Число ячеек в ЛП N_c : 10

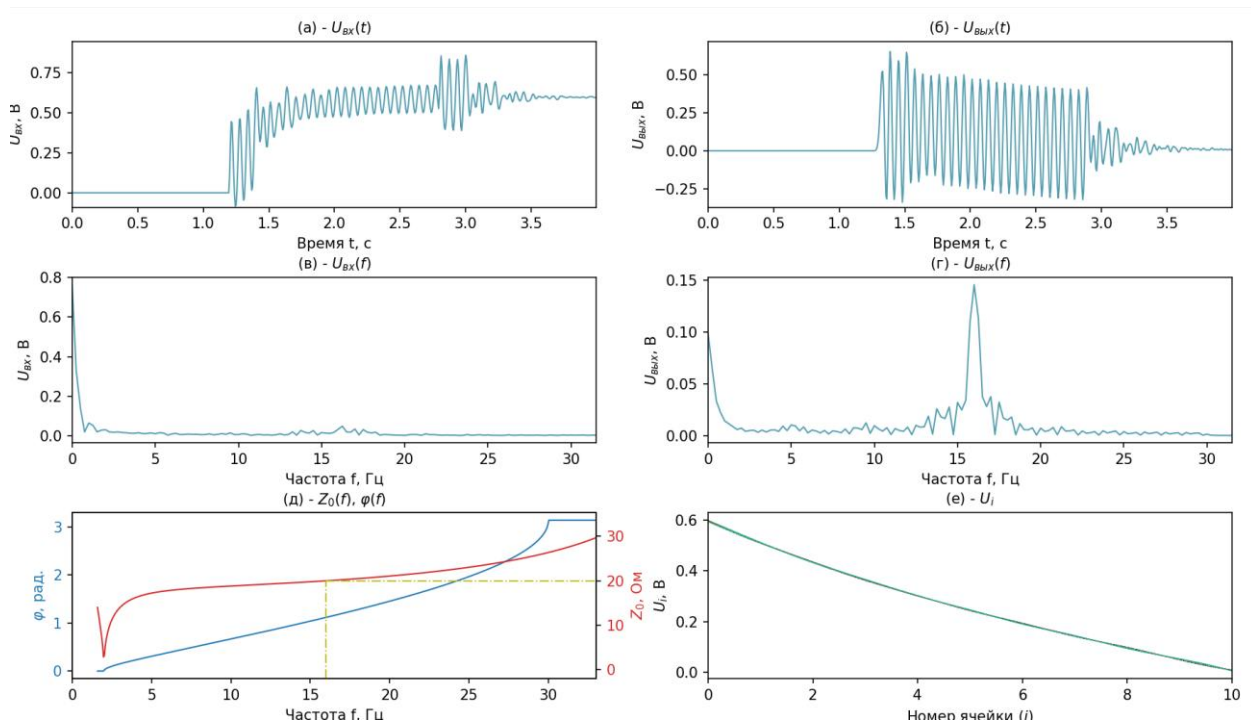


Рис. 3.4. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени. Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового

сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 3.4 (а) показана зависимость входного напряжения ВЧ импульса с частотой, равной 28.5 Гц, от времени. Амплитуда сигнала непостоянна. На рисунке 3.4 (б) показана зависимость выходного напряжения от времени, она заметно отличается от зависимости входного напряжения. На рисунке 3.4 (в) и 3.4 (г) показаны спектры входного и выходного сигнала. На обоих сигналах доминирующей частотой является 16 Гц, но по амплитуде графики отличаются. На рисунке 3.4 (д) изображены зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты. На рисунке 3.4 (е) показано неравномерное распределение напряжений по ячейкам, что связано с рассогласованием импедансов.

Задание 4.3. НЧ импульс ($G=10$).

а) $K_0 = K_N = 1; N_c = 500$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: НЧ импульс

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 2 Гц

Проводимость G : 10 1/Ом

Согласование слева K_0 : 1.0

Согласование справа K_N : 1.0

Временной интервал T_c : 4 с

Число ячеек в ЛП N_c : 500

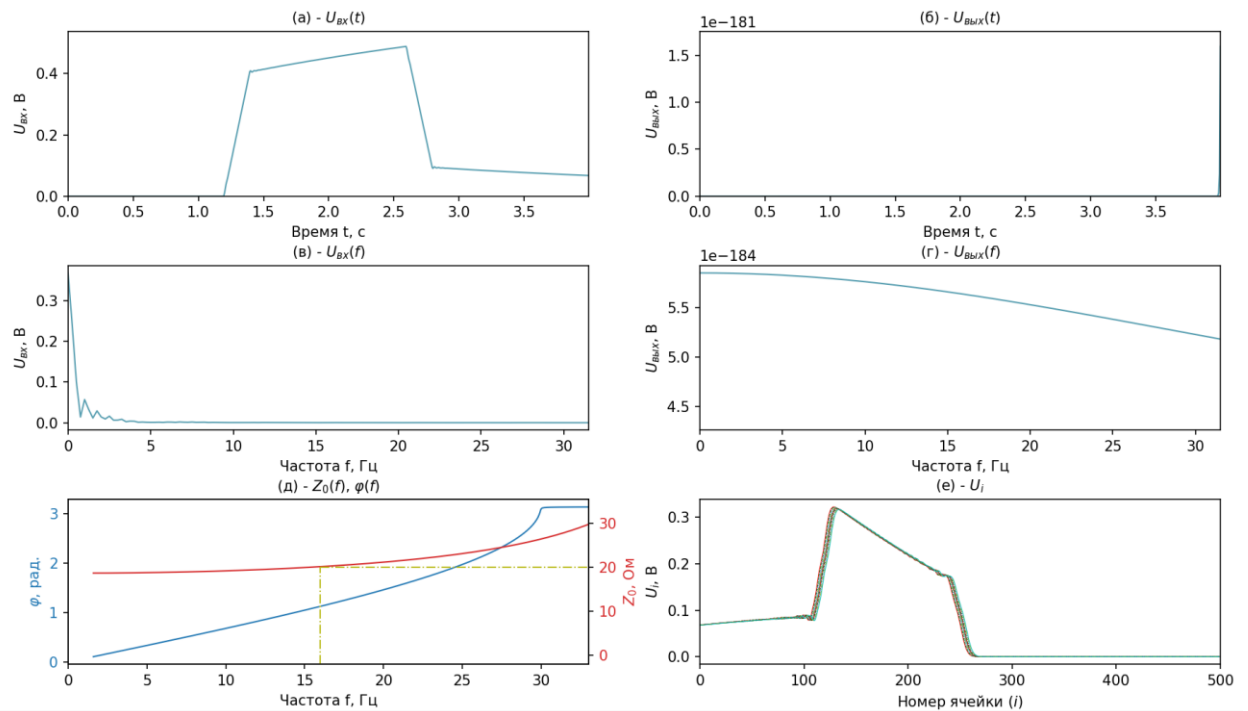


Рис. 4.1. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 4.1 (а) показана зависимость входного напряжения НЧ импульса от времени. Форма сигнала – прямоугольник с медленно меняющейся амплитудой. На рисунке 4.1 (б) показана зависимость выходного напряжения от времени. Она выглядит как прямая, равная нулю, то есть выходного сигнала нет. На рисунке 4.1 (в) и 4.1 (г) показаны спектры входного и выходного сигнала, которые также заметно отличаются. На рисунке 4.1 (д) изображены зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты. На рисунке 4.1 (е) показано равномерное распределение напряжений по ячейкам.

б) $K_0 = K_N = 10; N_c = 500$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: НЧ импульс

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 2 Гц

Проводимость G : 10 1/Ом

Согласование слева K_0 : 10.0

Согласование справа K_N : 10.0

Временной интервал T_c : 4 с
Число ячеек в ЛП N_c : 500

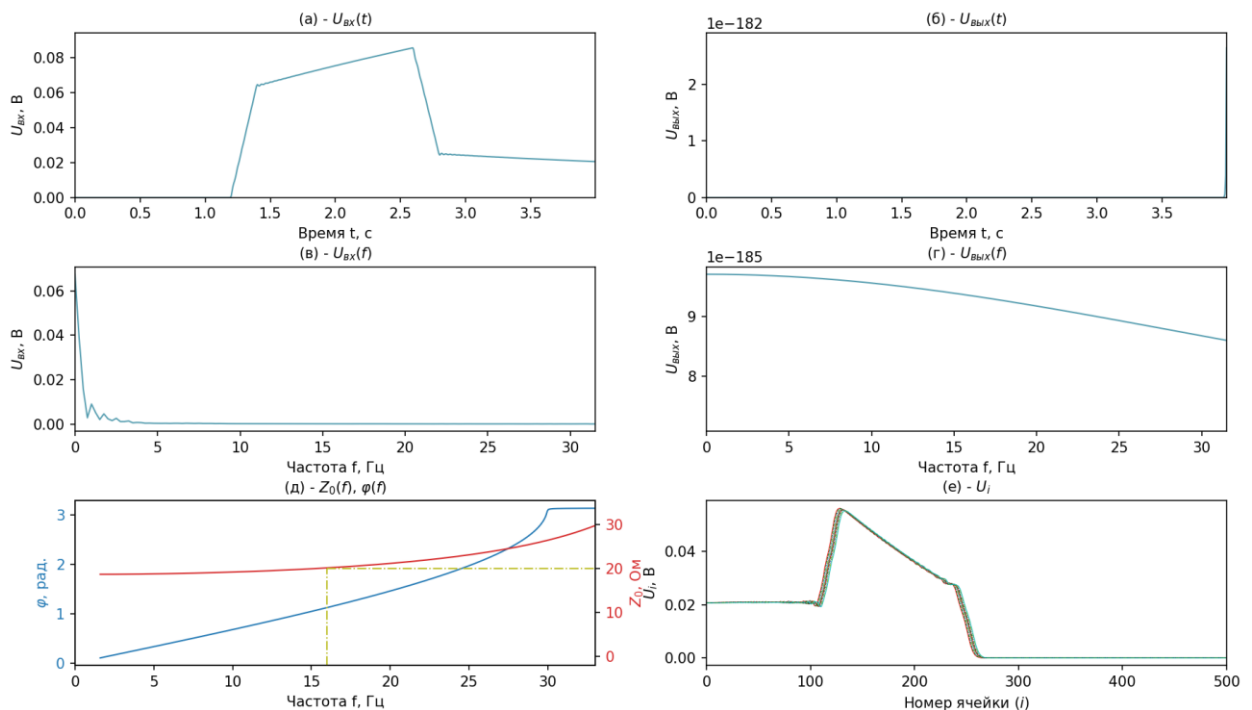


Рис. 4.2. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 4.2 (а) показана зависимость входного напряжения НЧ импульса от времени. Форма сигнала такая же, что и в 4.1 (а), но уменьшенная из-за измененных значений импедансов. Остальные формы сигналов такие же, но также с измененными амплитудами.

в) $K_0 = K_N = 0.1$; $N_c = 500$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: НЧ импульс

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 2 Гц

Проводимость G : 10 1/Ом

Согласование слева K_0 : 0.1

Согласование справа K_N : 0.1

Временной интервал T_c : 4 с

Число ячеек в ЛП N_c : 500

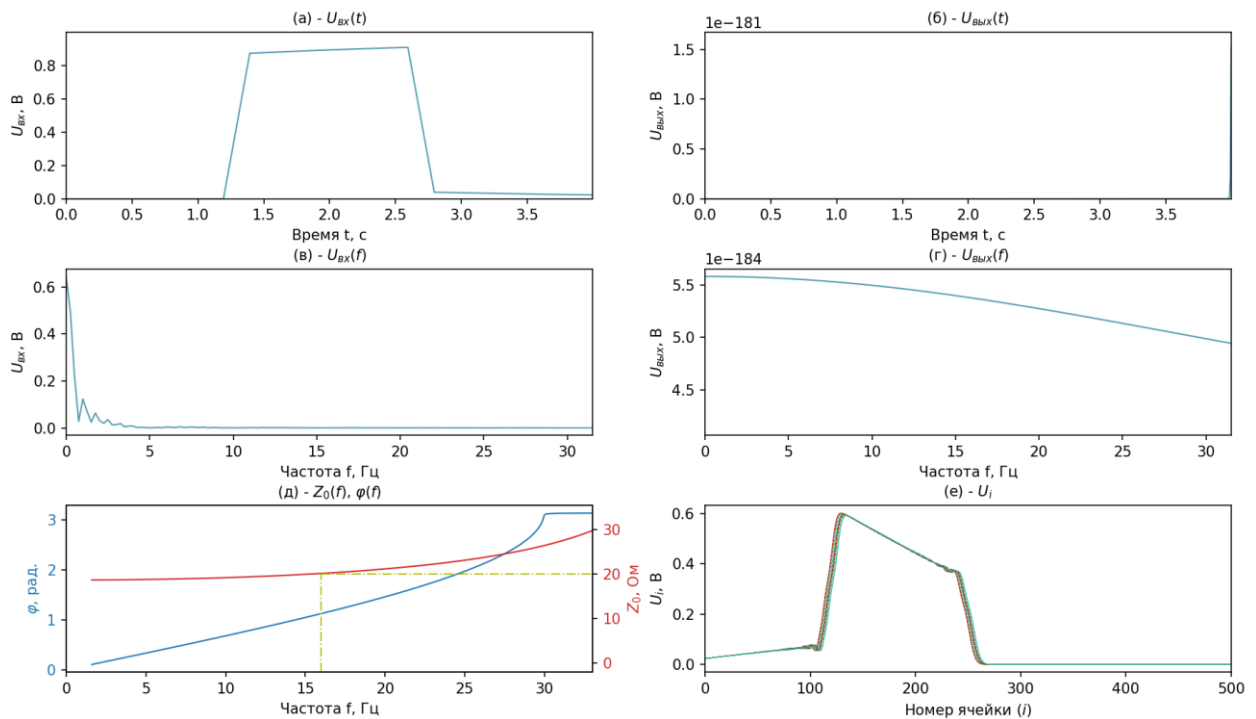


Рис. 4.3. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 4.3 (а) показана зависимость входного напряжения НЧ импульса от времени. Форма сигнала такая же, что и в 4.1 (а) и в 4.2 (а), но увеличенная из-за измененных значений импедансов. Остальные формы сигналов такие же, но также с измененными амплитудами.

Задание 4.4. НЧ+ВЧ импульс ($G=10$).

а) $f_c = f_0$; $K_0 = K_N = 1$; $N_c = 500$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: НЧ+ВЧ импульс

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 16 Гц

Проводимость G : 10 1/Ом

Согласование слева K_0 : 1.0

Согласование справа K_N : 1.0

Временной интервал T_c : 4 с

Число ячеек в ЛП N_c : 500

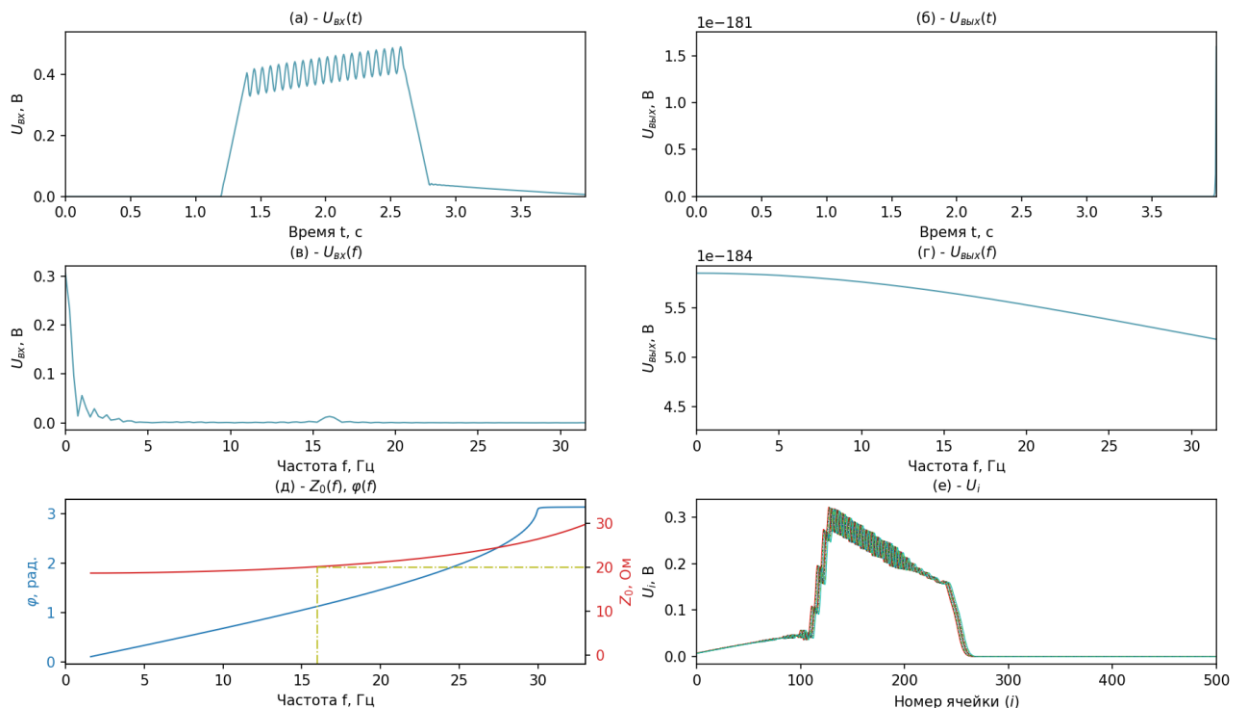


Рис. 5.1. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 5.1 (а) показана зависимость входного напряжения НЧ+ВЧ импульса от времени. Амплитуда сигнала стабильна. На рисунке 5.1 (б) показана зависимость выходного напряжения от времени. Она выглядит как прямая, равная нулю, то есть выходного сигнала нет. На рисунке 4.1 (в) и 4.1 (г) показаны спектры входного и выходного сигнала, которые также заметно отличаются. На рисунке 4.1 (д) изображены зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты. На рисунке 4.1 (е) показано равномерное распределение напряжений по ячейкам. Напряжение на последних ячейках всегда остается равным 0.

$$6) f_c = 0.95f_h = 28.5; K_0 = K_N = 1; N_c = 500$$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: НЧ+ВЧ импульс

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Частота сигнала f_c : 28.5 Гц

Проводимость G : 10 1/Ом

Согласование слева K_0 : 1.0

Согласование справа K_N : 1.0

Временной интервал T_c : 4 с
Число ячеек в ЛП N_c : 500

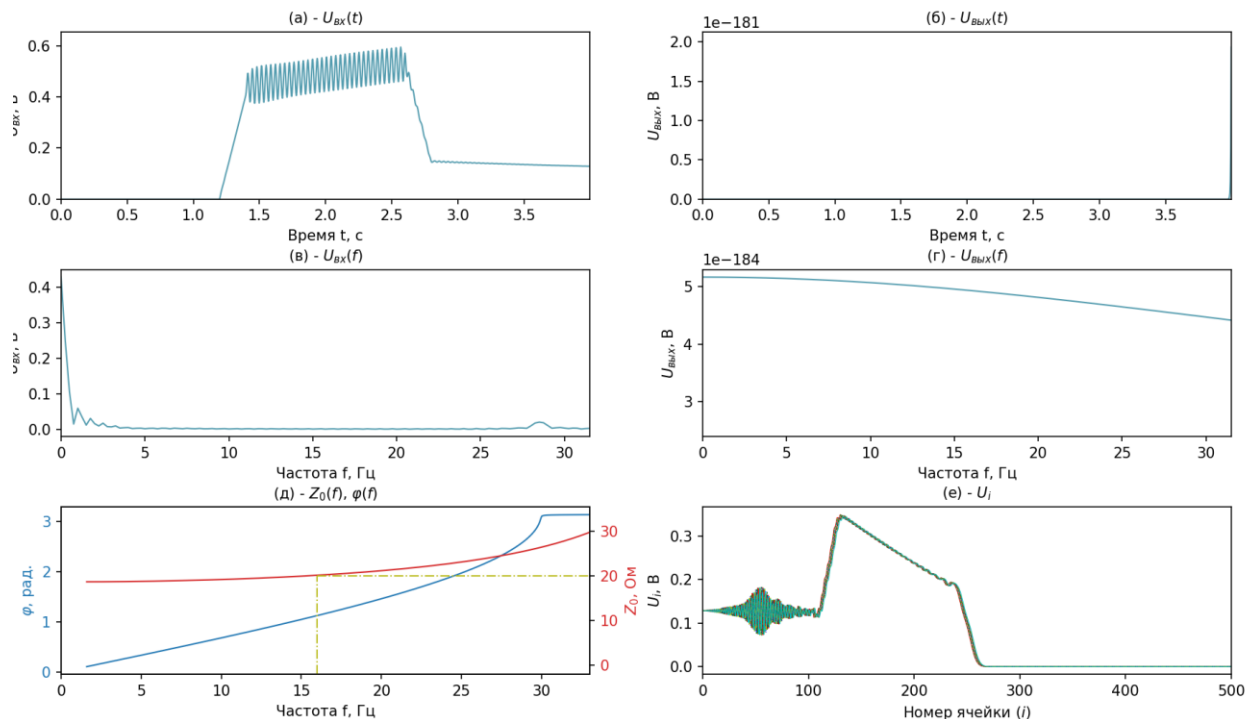


Рис. 5.2. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

Рисунок 5.2 практически аналогичен рисунку 5.1, но распределение напряжений по ячейкам в данном случае неравномерно.

Задание 4.5. ШП импульс ($G=0$).

а) $f_b = 0.95f_h = 28.5$; $f_h = 1.2f_l = 2.4$; $K_0 = K_N = 1$; $N_c = 10$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: НЧ+ВЧ импульс

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Верхняя частота сигнала f_b : 28.5 Гц

Нижняя частота сигнала f_h : 2.4 Гц

Проводимость G : 0 1/Ом

Согласование слева K_0 : 1.0

Согласование справа K_N : 1.0

Временной интервал T_c : 4 с
Число ячеек в ЛП N_c : 10

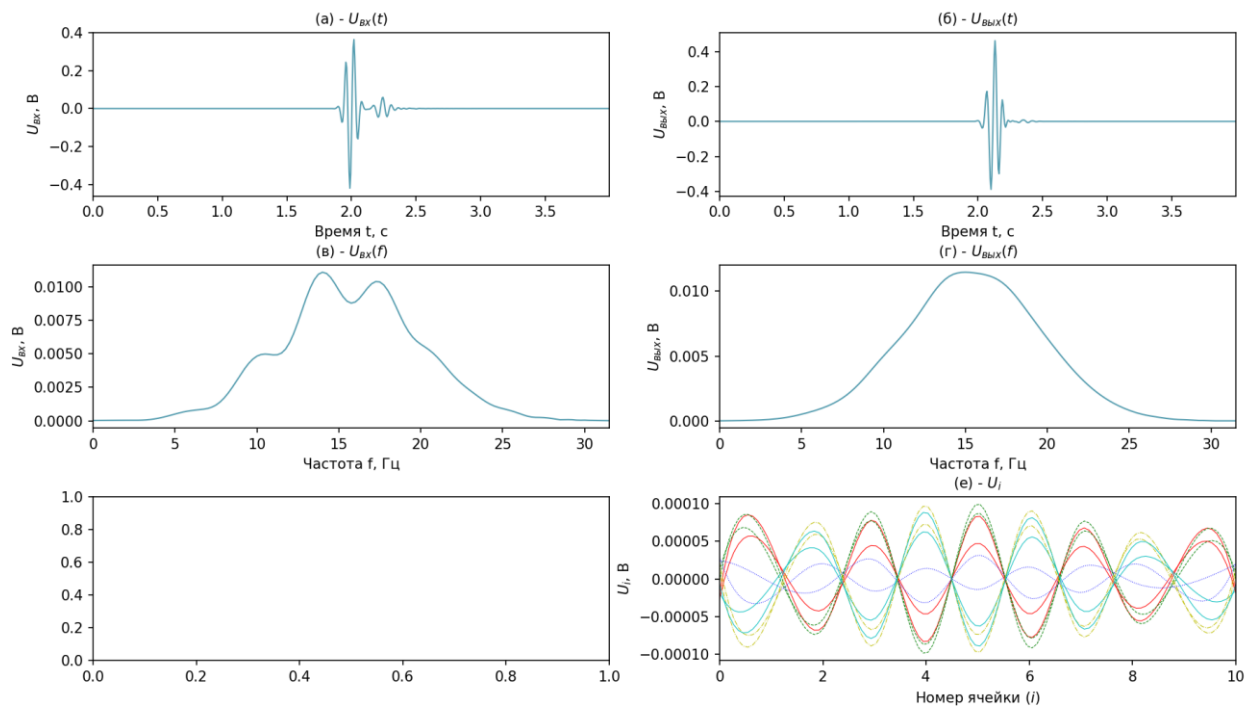


Рис. 6.1. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

На рисунке 6.1 (а) показана зависимость входного напряжения ШП импульса от времени. На рисунке 6.1 (б) показана зависимость выходного напряжения от времени. Форма сигнала такая же, что и на 6.1 (а), но амплитуда сигнала уменьшена. На рисунке 6.1 (в) и 6.1 (г) показаны спектры входного и выходного сигнала. На этих графиках можно как раз заметить изменение амплитуды. Также видно, что сигнал захватывает большой диапазон частот. На рисунке 3.4 (е) показано равномерное распределение напряжений по ячейкам.

$$\text{б) } f_v = 0.95f_h = 28.5; f_h = 1.2f_l = 2.4; K_0 = K_N = 1; N_c = 20$$

Исходные данные для расчета:

Сигнал возбуждения ЛП: НЧ+ВЧ импульс

Граничные частоты: $f_l = 2$ Гц, $f_h = 30$ Гц

Волновое сопротивление на частоте 16: $Z_0 = 20$ Ом

Верхняя частота сигнала f_v : 28.5 Гц

Нижняя частота сигнала f_v : 2.4 Гц

Проводимость G : 0 1/Ом
 Согласование слева K_0 : 1.0
 Согласование справа K_N : 1.0
 Временной интервал T_s : 4 с
 Число ячеек в ЛП N_s : 20

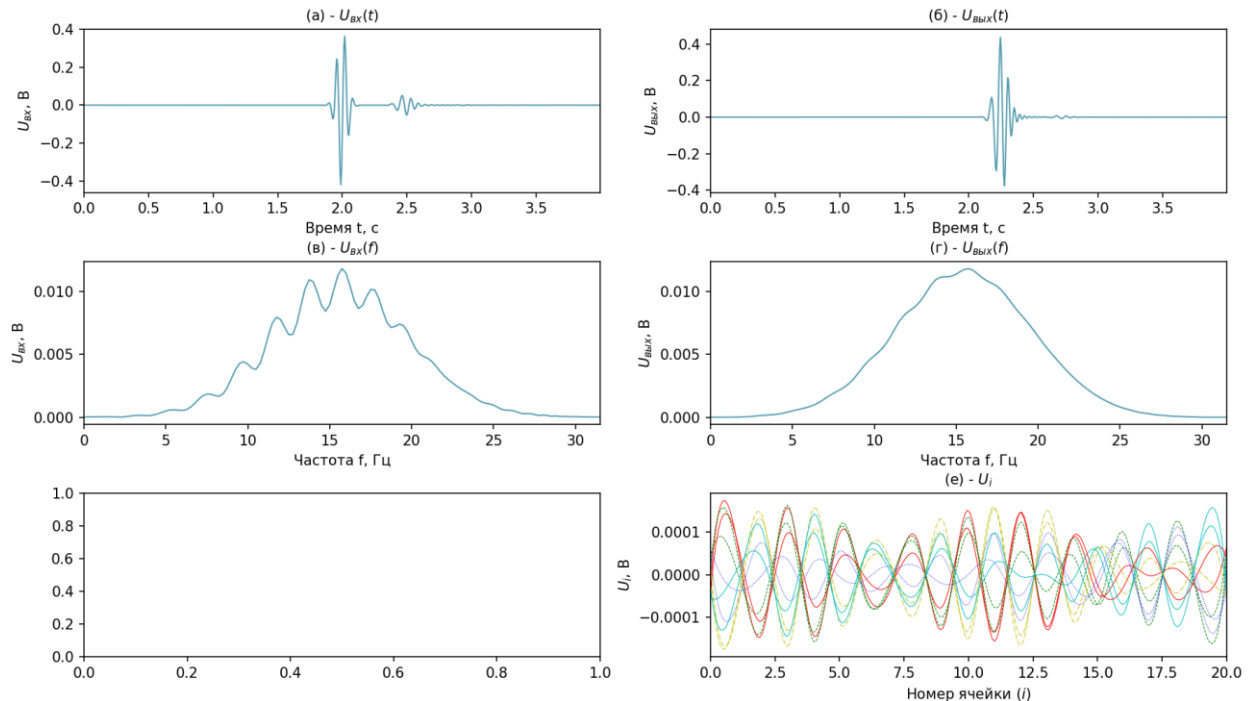


Рис. 6.2. Зависимости входного (а) и выходного (б) напряжения от времени.

Спектры входного (в) и выходного (г) сигналов. Зависимости фазового сдвига на ячейку и волнового сопротивления от частоты (д). Распределения напряжений по ячейкам вдоль линии передачи в различные моменты времени (е).

Графики на рисунке 6.2 схожи с графиками на рисунке 6.1, но отличается спектр выходного сигнала (г) и распределение напряжений по ячейкам (е). На 6.2 спектр не такой плавный, как на 6.1, а распределение напряжений по ячейкам не такое равномерное.

Ответы на контрольные вопросы

1. При возбуждении линии передачи гармоническим сигналом возможно появление постоянной составляющей. Чем обусловлено ее наличие и каким образом этот эффект можно устранить?

Постоянная составляющая может появиться из-за несогласованности импедансов или неправильного выбора граничных условий (например, при наличии активных элементов с разными полярностями). Этот эффект

связан с тем, что энергия сигнала частично отражается от конечных нагрузок, что приводит к формированию стоячей волны

Чтобы устранить постоянную составляющую, необходимо обеспечить согласование импедансов ($Z_0=Z_N$) для минимизации отражений, а также использовать фильтры нижних частот для подавления постоянной составляющей.

2. Как сказывается на распространении сигнала в линии передачи изменение условий согласования?

Изменение условий согласования приводит к следующим эффектам :

- а) Появление отражений, которые вызывают искажения сигнала (см. рисунки 2.4(е), 3.4(е)).
- б) Формирование режима стоячей волны, при котором энергия сигнала распределяется неравномерно по ячейкам (см. рисунки 4.2(е), 4.3(е)).
- с) Увеличение потерь энергии сигнала из-за рассогласования.

3. Чем обусловлен выбор эффективно передаваемой полосы частот (ЭППЧ) линии передачи? Исходя из условий неискажающей передачи, укажите ширину ЭППЧ линии передачи для вашего варианта задания.

ЭППЧ обусловлена диапазоном частот, в котором линия передачи обеспечивает минимальные искажения сигнала. Для неискажающей передачи ширина ЭППЧ определяется как разница между верхней (f_h) и нижней (f_l) граничными частотами.

4. Укажите причину возникновения пульсаций в распределении сигнала вдоль линии передачи при отстройке частоты сигнала от частоты, на которой выполнено согласование с конечными нагрузками.

Пульсации возникают из-за интерференции бегущей и отраженной волн, что приводит к формированию стоячей волны. Например, на рисунке 2.3 (е) видно неравномерное распределение напряжений по ячейкам, что указывает на наличие пульсаций.

5. Каковы особенности распространения гармонических сигналов на частотах, лежащих за пределами НЧ и ВЧ границ полосы линии передачи?

- a) Сигналы сильно затухают из-за ограниченной полосы пропускания линии передачи (см. рисунки 2.3(б), 6.2(б)).
 - b) Происходит значительное искажение формы сигнала, так как высокочастотные компоненты подавляются, а низкочастотные - ослабляются.
 - c) Возможны отражения, вызванные рассогласованием импедансов.
6. С чем связано расплывание ВЧ импульса при изменении частоты сигнала?

Расплывание ВЧ импульса связано с дисперсией сигнала, которая возникает из-за зависимости фазовой скорости от частоты. На высоких частотах ($f > f_h$) линия передачи становится менее эффективной, что приводит к увеличению времени нарастания и спада импульса (см. рисунок 3.3 (б)).

7. Как влияют полосовые характеристики линии передачи на прохождение и возникающие искажения НЧ импульса?

Полосовые характеристики линии передачи влияют на НЧ импульс следующим образом:

- a) На низких частотах ($f < f_l$) сигналы ослабляются из-за ограниченной полосы пропускания (см. рисунки 4.1(б), 4.2(б)).
 - b) Возникают искажения формы импульса, так как линия передачи не способна эффективно передавать низкочастотные компоненты.
 - c) При рассогласовании импедансов возможны отражения, которые дополнительно искажают сигнал.
8. Изменение условий согласования линии передачи может приводить НЧ импульса к отражению от конечных нагрузок с сохранением или изменением его полярности. Чем это обусловлено?

Отражения НЧ импульса обусловлены рассогласованием импедансов. Если $K_0 > K_N$, то отраженный сигнал сохраняет свою полярность. Если $K_0 < K_N$, то меняет.

9. Объясните различия в групповых скоростях ВЧ и НЧ импульсов при их совместном распространении с увеличением частоты сигнала ВЧ импульса.

Групповая скорость зависит от частоты сигнала:

- Для НЧ импульсов групповая скорость остается практически постоянной, так как они лежат в области низких частот.
- Для ВЧ импульсов групповая скорость уменьшается с увеличением частоты из-за дисперсии сигнала.

Это приводит к тому, что ВЧ импульсы "отстают" от НЧ импульсов при совместном распространении.

10. Почему при возбуждении линии передачи широкополосным импульсом в режиме согласования в АЧХ возникают резонансные пики? Сопоставьте с АЧХ для рассогласованной системы.

В режиме согласования резонансные пики возникают из-за интерференции различных частотных компонентов сигнала, которые усиливаются на определенных частотах. В рассогласованной системе резонансные пики становятся более выраженными из-за отражений, что приводит к большему числу пиков в АЧХ.

11. Чем определяется количество резонансных пиков в АЧХ линии передачи при ее возбуждении коротким широкополосным импульсом?

Количество резонансных пиков определяется:

- Длиной линии передачи (N_c): больше ячеек — больше пиков.
- Положением частот сигнала относительно ЭППЧ: если частоты сигнала попадают в резонансные области, количество пиков увеличивается.

Например, на рисунке 6.2(д) видно больше пиков, чем на рисунке 6.1(д), из-за увеличения N_c .

Код

```
import numpy as np
from math import *
import matplotlib.pyplot as plt
```

```

from scipy.interpolate import make_interp_spline

#Перевод частоты в циклическую
def f2w(f):
    return 2.0*pi*f

def Z1(f, C1):
    return 2.0/(1j*f2w(f)*C1)

def Z2(f, C2):
    return 1.0/(1j*f2w(f)*C2 + G)

def Z3(f, L):
    return 1.0j*f2w(f)*L

def Gam(f, L, C1, C2):
    ZY = (Z2(f, C2)+Z3(f, L))/Z1(f, C1)
    return 2.0 * np.arcsinh(np.sqrt(ZY))

def Zw_func(f, L, C1, C2):
    return np.sqrt((Z1(f, C1)**2*(Z2(f, C2)+Z3(f, L)))/(2*Z1(f, C1)+Z2(f, C2)+Z3(f, L)))

#Производная гармонического сигнала
def d_harm_signal(t):
    return 2.0*pi*fc*sin(2.0*pi*fc*t)

#Производная гармонического сигнала с плавным нарастанием
def d_harm_imp(t):
    if t > T_start and t < T_stop:
        return 2.0*pi*fc*sin(2.0*pi*fc*t)
    else:
        return 0

#Производная НЧ импульса
def d_LFimpulse(t):
    if T_start <= t < T_start + fwFront:
        return 1 / fwFront
    elif T_stop - bwFront <= t < T_stop:
        return -1/ bwFront
    else:
        return 0

#Производная НЧ + ВЧ импульса
def d_TWOimpulses(t):
    if T_start <= t < T_start + fwFront:
        return 1 / fwFront
    elif T_start + fwFront <= t < T_stop - bwFront:
        return 0.1 * 2.0*pi*fc*cos(2.0*pi*fc*t)
    elif T_stop - bwFront <= t < T_stop:
        return -1/ bwFront
    else:
        return 0

#Производная широкополосного сигнала
def d_BBsignal(t):
    ddt = 1 / (fh*0.95 - fl*1.2)

```

```

fc1 = (fh*0.95 + fl*1.2) / 2
T = Tc
# Гауссовская огибающая и несущая
gaussian = np.exp(-( (T/2 - t)**2 ) / (2 * ddt**2))
carrier = np.sin(2 * np.pi * fc1 * t)
signal = gaussian * carrier
# Производная огибающей (du/dt)
dgaussian_dt = gaussian * ( (T/2 - t) / ddt**2 )
# Производная несущей (dv/dt)
dcarrier_dt = 2 * np.pi * fc1 * np.cos(2 * np.pi * fc1 * t)
# Полная производная сигнала: ds/dt = du/dt * v + u * dv/dt
return dgaussian_dt * carrier + gaussian * dcarrier_dt

global nvar, fc, Tc, fl, fh, Vinp, time, Vout, fft_freq, sp_inp, sp_out, Vs,
T_start, T_stop, fwFront, bwFront, G

nvar = 2

fc = float(input('Частота сигнала '))
Tc = 4

T_start = Tc*0.1
T_stop=0.3*Tc

fwFront = bwFront = 0.01*Tc

fl = nvar
fh = 10 * (nvar + 1)
f0 = (fl + fh) * 0.5
Z0 = 10 * nvar

type_signal = int(input('Тип сигнала\n1 - ВЧ сигнал\n2 - ВЧ импульс\n3 - НЧ
импульс\n4 - ВЧ+НЧ импульс\n5 - ШП '
                        'импульс'))
Nc = int(input('Число ячеек в ЛП '))

L = (sqrt(Z0**2*f2w(f0)**2*(2*f2w(fh)**2-f2w(fl)**2-f2w(f0)**2)/
          ((f2w(fh)**2-f2w(fl)**2)**2*(f2w(f0)**2-f2w(fl)**2))))
C1 = 2.0 / L / (f2w(fh)**2 - f2w(fl)**2)
C2 = 1.0 / (f2w(fl)**2 * L)
G = 0

print('Параметры отдельной ячейки ЛП:')
print('C1 = {0: f}\nC2 = {1: f}\nL = {2: f}'.format(C1, C2, L))

npp = 10          #Количество точек на период гармонического сигнала
dt = 1/(fc*npp)   #Шаг по времени
num = int(Tc / dt) #Количество временных отсчетов

freq = np.linspace(0.8*fl, fh*1.2, num)

#Задание производной сигнала возбуждения ЛП
if type_signal == 1:
    d_signal = d_harm_signal
elif type_signal == 2:
    d_signal = d_harm_imp

```

```

elif type_signal == 3:
    d_signal = d_LFimpulse
elif type_signal == 4:
    d_signal = d_TWOimpulses
elif type_signal == 5:
    d_signal = d_BBsignal

A0 = 1 #Амплитуда сигнала слева
AN = 0 #Амплитуда сигнала справа
K0 = KN = 1 #Коэффициенты при нагрузочных сопротивлениях
# K0 = 2
# KN = 5

#Количество итераций для решения уравнений возбуждения
dpp = 20
print('dpp = {0: d}'.format(dpp))

aU = [0] * Nc #Массив напряжений на емкости C2
dU = [0] * Nc #Массив производных напряжений на емкости C2
aV = [0] * (Nc+1) #Массив напряжений на емкости C1
dV = [0] * (Nc+1) #Массив производных напряжений на емкости C1

Vinp = [0] * num #Массив входных напряжений
Vout = [0] * num #Массив выходных напряжений
time = [0] * num #Массив временных отсчетов

Vs = [0] * npp #Массив напряжений на C1 вдоль ЛП на одном периоде сигнала
for i in range(npp): Vs[i] = [0] * (Nc+1)

#Решение уравнений возбуждения ЛП
for it in range(num):
    time[it] = dt * it
    for i in range(dpp):
        dV[0] += (1.0/(L*C1))*(aV[1]-
aV[0]+aU[0])+1.0/(Z0*K0*C1)*(A0*d_signal(time[it])-dV[0]))*dt/dpp
        for ic in range(Nc):
            dU[ic] += (1.0/(L*C2)*(aV[ic]-aV[ic+1]-aU[ic])-
G/C2*dU[ic])*dt/dpp
            if ic == 0: continue
            dV[ic] += (0.5/(L*C1)*(aV[ic-1]-2.0*aV[ic]+aV[ic+1]+aU[ic]-aU[ic-
1]))*dt/dpp
            dV[Nc] += (1.0/(L*C1)*(aV[Nc-1]-aV[Nc]-aU[Nc-
1])+1.0/(Z0*KN*C1)*(AN*d_signal(time[it])-dV[Nc]))*dt/dpp

        for ic in range(Nc):
            aV[ic] += dV[ic]*dt/dpp
            aU[ic] += dU[ic]*dt/dpp
            aV[Nc] += dV[Nc]*dt/dpp

    if num-it <= npp:
        for ic in range(Nc+1):
            Vs[it-(num-npp)][ic] = aV[ic]

    Vinp[it] = aV[0]
    Vout[it] = aV[Nc]
    if it % 100 == 0:
        print('{0: 7.3f} {1: 7.3f} {2: 7.3f}'.format(time[it], Vinp[it],
Vout[it]))

```

```

#Расчет спектра входного и выходного сигналов
spectr_inp = np.fft.fft(Vinp)
spectr_out = np.fft.fft(Vout)
fft_freq = np.fft.fftfreq(num, Tc/num)

Gama = Gam(freq, L, C1, C2)
Zw = Zw_func(freq, L, C1, C2)
dF = (Gam(freq+0.01, L, C1, C2).imag-Gam(freq-0.01, L, C1, C2).imag) / 0.02

# Построение графиков
def drawAllGraph(separate=False):
    fig, ax = plt.subplots(nrows=3, ncols=2, figsize=(10, 10))
    fig.tight_layout(pad=3.0)
    ax1, ax2, ax3, ax4, ax5, ax6 = ax.flatten()
    drawGraph(fig, ax1, 0)
    drawGraph(fig, ax2, 1)
    drawGraph(fig, ax3, 2)
    drawGraph(fig, ax4, 3)
    drawGraph(fig, ax5, 4)
    drawGraph(fig, ax6, 5)
    plt.subplots_adjust(hspace=0.42)
    plt.show()

def drawGraph(fig, ax, ng, title=True):
    if ng == 0:
        ax.plot(time, Vinp, lw=1, color='#539caf', alpha=1)
        ax.set_xlim(time[0], time[-1])
        ax.set_ylim(min(Vinp) * 1.1, max(Vinp) * 1.1)
        if title: ax.set_title("(a) -  $U_{BX}(t)$ ", fontsize=10)
        ax.set_xlabel(r"Время t, c", fontsize=10)
        ax.set_ylabel(" $U_{BX}$ , B", fontsize=10)

    elif ng == 1:
        ax.plot(time, Vout, lw=1, color='#539caf', alpha=1)
        ax.set_xlim(time[0], time[-1])
        ax.set_ylim(min(Vout) * 1.1, max(Vout) * 1.1)
        if title: ax.set_title("(б) -  $U_{ВЫХ}(t)$ ", fontsize=10)
        ax.set_xlabel(r"Время t, c", fontsize=10)
        ax.set_ylabel(" $U_{ВЫХ}$ , B", fontsize=10)

    elif ng == 2:
        ax.plot(fft_freq[0:num//2], sp_inp[0:num//2], lw=1, color='#539caf',
alpha=1)
        ax.set_xlim(0, max(fh, fc) * 1.05)
        # ax.set_ylim(min(sp_inp[0:num//2] * 1.1, max(sp_inp[0:num//2]) *
1.05))
        if title: ax.set_title("(в) -  $U_{BX}(f)$ ", fontsize=10)
        ax.set_xlabel(r"Частота f, Гц", fontsize=10)
        ax.set_ylabel(" $U_{BX}$ , B", fontsize=10)

    elif ng == 3:
        ax.plot(fft_freq[0:num//2], sp_out[0:num//2], lw=1, color='#539caf',
alpha=1)
        ax.set_xlim(0, max(fh, fc) * 1.05)

```

```

# ax.set_ylim(min(sp_out[0:num//2]) * 1.1, max(sp_out[0:num//2]) *
1.05)
if title: ax.set_title("(r) -  $U_{BIX}(f)$ ", fontsize=10)
ax.set_xlabel("Частота f, Гц", fontsize=10)
ax.set_ylabel(" $U_{BIX}$ , В", fontsize=10)

elif ng == 4:
    if type_signal == 5:
        pass
    else:
        color = 'tab:blue'
        ax.plot(freq, Gama.imag, lw=1, color=color, alpha=1)
        ax.set_xlim(0, max(fh, fc) * 1.1)
        if title: ax.set_title("(д) -  $Z_0(f)$ ,  $\varphi(f)$ ",
fontsize=10)
        ax.set_xlabel("Частота f, Гц", fontsize=10)
        ax.set_ylabel(" $\varphi$ , рад.", color=color, fontsize=10)
        ax.tick_params(axis='y', labelcolor=color)

        ax = ax.twinx()
        color = 'tab:red'
        ax.plot(freq, abs(Zw), lw=1, color=color, alpha=1)
        ax.set_ylim(-0.1 * Z0, min(max(Zw.real), 3.5 * Z0))
        ax.set_ylabel(" $Z_0$ , Ом", color=color, fontsize=10)
        ax.vlines(f0, -0.1 * Z0, Z0, color='tab:olive',
linestyles='dashdot', lw=1)
        ax.hlines(Z0, f0, freq[-1], color='tab:olive',
linestyles='dashdot', lw=1)
        ax.tick_params(axis='y', labelcolor=color)

elif ng == 5:
    ax.set_prop_cycle(color=['r', 'g', 'b', 'y', 'c'], linestyle=['-', '-
-', ':', '-.', '-'], lw=5 * [0.5])
    ax.set_alpha(0.5)
    cells = np.linspace(0, Nc, Nc + 1)
    z_spl = np.linspace(0, Nc, (Nc + 1) * 10)
    for i in range(npp):
        spl = make_interp_spline(cells, Vs[i], k=3)
        ax.plot(z_spl, spl(z_spl))
    ax.set_xlim(0, Nc)
    if title: ax.set_title("(e) -  $U_i$ ", fontsize=10)
    ax.set_xlabel("Номер ячейки  $i$ ", fontsize=10)
    ax.set_ylabel(" $U_i$ , В", fontsize=10)

drawAllGraph()

```

Выводы:

- В ходе выполнения работы была успешно построена дискретная модель линии передачи, что позволило провести всесторонний анализ различных режимов её работы с разнообразными сигналами возбуждения.
- При согласованных импедансах ($K_0 = K_N$) наблюдается равномерное распределение напряжений по ячейкам линии передачи и отсутствие

отражений, что подтверждает эффективность такого подхода к минимизации искажений сигнала.

- Высокочастотные сигналы за пределами эффективно передаваемой полосы частот (ЭППЧ) демонстрируют значительные искажения формы и увеличение затухания, что соответствует теоретическим представлениям о работе линий передачи.
- Низкочастотные сигналы при высоких значениях проводимости ($G=10$) показывают существенное ослабление на выходе, что указывает на ограниченную способность линии передавать такие сигналы.
- Режим стоячей волны, возникающий при рассогласовании импедансов, приводит к неравномерному распределению энергии сигнала по ячейкам и увеличению потерь.