

ТОЭ: От теоремы Ленца-Ботто до РаРiRi – алгоритма и путешествия во времени. Ч. 1

Бутырин П. А., Путин В. В., Римский В. К.

Настоящий цикл работ призван восполнить пробелы, которых образовалось великое множество в учебниках по ТОЭ, в монографической и справочной литературе. Достойно сожаления, что в преддверии шестого технологического уклада в них доминируют информационные технологии циркуля и линейки, присущие четвертому укладу времен реализации плана ГОЭРЛО – 1 [1-9]. Начнем с забытой всеми теоремы Ленца-Ботто 1844 г., о которой в Википедии и учебниках даже не упоминается, как будто ее и нет вовсе.



1. Передача мощности и сигналов по линиям постоянного напряжения или тока

Будем полагать, что на входе линии постоянного напряжения генератор неограниченной мощности поддерживает постоянное напряжение $u(0, t) = 1$; для линии постоянного тока имеем $i(0, t) = 1$. Между ними существуют ряд принципиальных различий, что следует из приведенных ниже таблиц.

В табл. 1.3 представлены численные данные о передаче мощности в установившемся режиме по линии постоянного напряжения с параметрами: $u(0, t) = 1$, $l = 1/4$, $R = 2$, $G = 0$. В реальном масштабе $l = 1500$ км – четвертьволновая линия. Для сравнения укажем, что в структуре межрегиональных и региональных связей ЛЭП согласно концепции развития электроэнергетической системы США в период с 2010 до 2030 г.г. длина линий постоянного тока варьируется от 1400 до 2300 км.

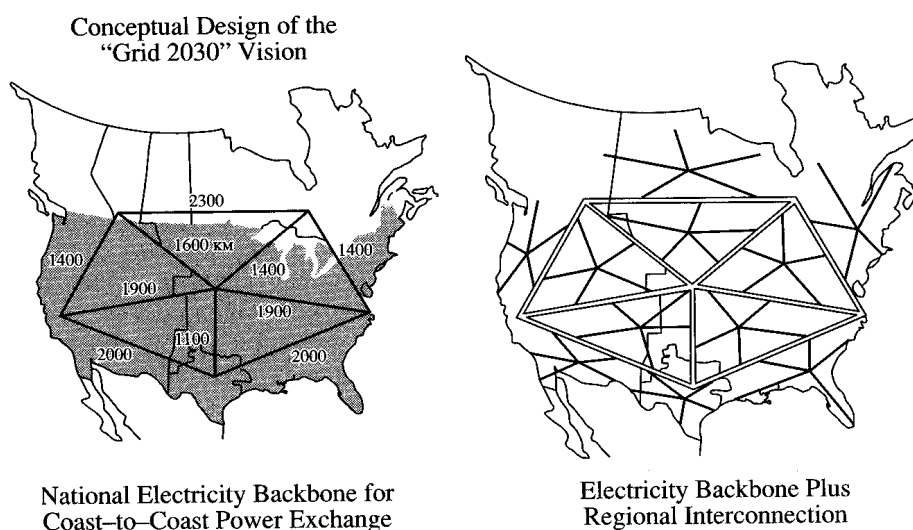


Таблица 1.1. Параметры воздушных линий.

Класс напряжения кВ	L МГн/км	C нФ/км	R мОм/км	G нСм/км	Z_B Ом	a км/с
35	1.293	8.60	198	—	387.7	299883
110	1.290	8.95	121	56	379.6	294302
150	1.338	8.60	120	54	394.4	294796
220	1.350	8.76	60	55	392.6	290791
330	1.020	11.14	30	70	302.6	296659
400	0.968	11.59	20	73	289.0	298552
500	0.898	12.96	20	81	263.2	293129
750	0.965	12.42	15	81	278.7	288852
1150	0.860	13.95	11	88	248.3	288711

Таблица 1.2. Параметры кабельных линий.

Класс напряжения кВ	L мГн/км	C нФ/км	R мОм/км	G нСм/км	Z_B Ом	a км/с
35	31.20	250	1880	0	353.3	11323
110	0.4460	421.05	22	317.30	32.54	72973
220	0.3567	330.92	22	249.40	32.83	92004
330	0.2389	263.20	32	198.35	30.12	126110
500	0.1401	216.56	32	163.20	25.43	181548

Таблица 1.3. Передача мощности в установившемся режиме по линии постоянного напряжения с параметрами: $u(0, t) = 1$, $l = 1/4$, $R = 2$, $G = 0$.

P_0	P_1	КПД	R_S	Примечания
1.00	0.50	0.50	1/2	Теорема Ленца-Ботто 1844 г.
1.32	0.44	0.34	1/4	
1.60	0.32	0.20	1/8	
2	0	0	0	КЗ (короткое замыкание)
0.67	0.45	0.67	1	
0.40	0.32	0.80	2	
0.23	0.20	0.87	4	
0.12	0.11	0.95	8	
0.061	0.059	0.97	16	
0	0	0	∞	ХХ (холостой ход)

Таблица 1.4. Передача мощности в установившемся режиме по линии постоянного напряжения с параметрами: $u(0, t) = 1$, $l = 1/4$, $R = G = 2$ (неискажающая линия).

P_0	P_1	КПД	R_S	Примечания
1.28	0.42	0.33	1/2	Максимальная мощность P_1
1.56	0.39	0.24	1/4	
1.80	0.29	0.16	1/8	
2.17	0	0	0	КЗ (короткое замыкание)

1.00	0.37	0.37	1	
0.78	0.26	0.33	2	
0.64	0.16	0.25	4	
0.55	0.09	0.16	8	
0.50	0.05	0.09	16	
0.46	0	0	∞	ХХ (холостой ход)

Таблица 1.5. Передача мощности в установившемся режиме по линии постоянного тока с параметрами: $i(0, t) = 1$, $l = 1/4$, $R = 2$, $G = 0$.

P_0	P_1	КПД	R_S	Примечания
1.00	0.50	0.50	1/2	
0.75	0.25	0.30	1/4	
0.62	0.12	0.20	1/8	
0.50	0	0	0	КЗ (короткое замыкание)
1.50	1.00	0.67	1	
2.50	2.00	0.80	2	
4.50	4.00	0.89	4	
8.50	8.00	0.94	8	
16.50	16.00	0.97	16	Максимальная мощность P_1
∞	0	0	∞	ХХ (холостой ход)

Как видим, для линии постоянного тока теорема Ленца-Ботто уже не работает. При наличии генератора неограниченной мощности передаваемую в нагрузку R_S мощность P_1 можно увеличить в десятки раз при условии, что нет ограничений на перепады напряжений вдоль линии электропередачи.

Таблица 1.6. Передача мощности в установившемся режиме по линии постоянного тока с параметрами: $i(0, t) = 1$, $l = 1/4$, $R = G = 2$ (неискажающая линия).

P_0	P_1	КПД	R_S	Примечания
0.78	0.26	0.33	1/2	
0.64	0.16	0.25	1/4	
0.55	0.09	0.16	1/8	
0.46	0	0	0	КЗ (короткое замыкание)

1.00	0.37	0.37	1	
1.28	0.43	0.33	2	Максимальная мощность P_1
1.57	0.39	0.25	4	
1.80	0.29	0.16	8	
1.96	0.18	0.09	16	
2.17	0	0	∞	ХХ (холостой ход)

А теперь попытаемся увеличить передаваемую в нагрузку $R_S = 1/2$ мощность $P_1 = 0.5$, периодически меняя полярность источника напряжения через равные промежутки времени Δ_S . Для линии постоянного напряжения имеем оптимальное значение $\Delta_S = 0.5$, для линии постоянного тока $\Delta_S = 2.0$, причем максимумы средней за период мощности достаточно близки: $P_1 = 0.85$ и $P_1 = 0.87$. А вот для нагрузки $R_S = 1$ получаем достаточно неожиданный результат. Если для линии постоянного напряжения потребляемую мощность удастся увеличить с $P_1 = 0.45$ до $P_1 = 0.64$ при $\Delta_S = 1.5$, то для линии постоянного тока любое периодическое переключение полярности источника сопровождается только снижением мощности. При $\Delta_S = 1.5$ имеем самое большое уменьшение с $P_1 = 1.0$ до $P_1 = 0.59$.

Таблица 1.7. Передаваемая в нагрузку $R_S = 1/2$ мощность и КПД в зависимости от периода изменения полярности источника напряжения $u(0, t) = \pm 1$ при $l = 1/4$, $R = 2$, $G = 0$.

P_0	P_1	КПД	Δ_S	Примечания
1.00	0.50	0.50	∞	Теорема Ленца-Ботто 1844 г.
1.51	0.85	0.56	0.5	max P_1
1.50	0.85	0.56	1.0	
0.84	0.49	0.59	1.5	
0.63	0.36	0.58	2.0	min P_1
0.72	0.40	0.56	2.5	
0.78	0.43	0.55	3.0	
0.78	0.43	0.55	3.5	
0.80	0.43	0.53	4.0	

Таблица 1.8. Передаваемая в нагрузку $R_S = 1/2$ мощность и КПД в зависимости от периода изменения полярности источника тока $i(0, t) = \pm 1$ при $l = 1/4$, $R = 2$, $G = 0$.

P_0	P_1	КПД	Δ_S	Примечания
-------	-------	-----	------------	------------

1.00	0.50	0.50	∞	
0.66	0.37	0.56	0.5	min P_1
0.66	0.37	0.56	1.0	
0.98	0.58	0.59	1.5	
1.50	0.87	0.58	2.0	max P_1
1.44	0.81	0.56	2.5	
1.35	0.74	0.55	3.0	
1.27	0.69	0.54	3.5	
1.20	0.64	0.53	4.0	

Таблица 1.9. Передаваемая в нагрузку $R_S = 1$ мощность и КПД в зависимости от периода изменения полярности источника напряжения $u(0, t) = \pm 1$ при $l = 1/4, R = 2, G = 0$.

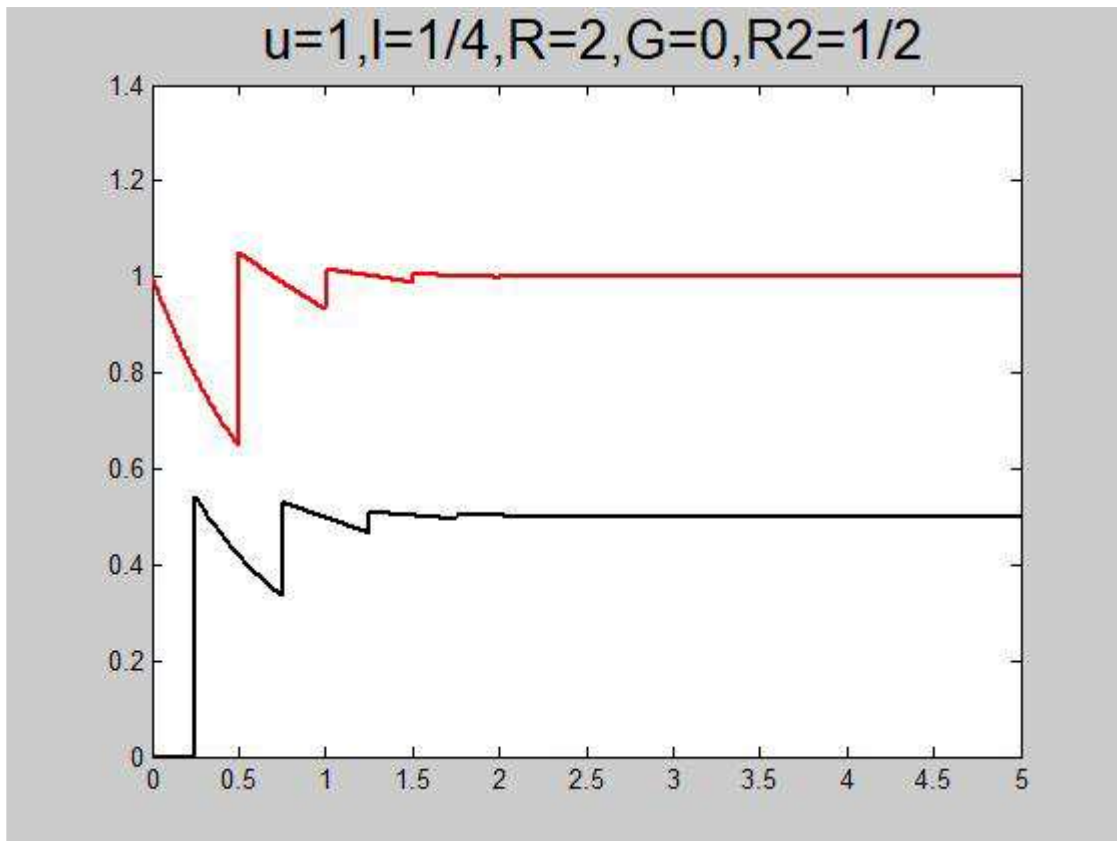
P_0	P_1	КПД	Δ_S	Примечания
0.67	0.45	0.67	∞	
1.00	0.61	0.61	0.5	
1.00	0.61	0.61	1.0	
1.03	0.64	0.62	1.5	max P_1
0.95	0.60	0.63	2.0	
0.88	0.56	0.63	2.5	
0.84	0.54	0.64	3.0	
0.82	0.52	0.64	3.5	
0.80	0.51	0.64	4.0	

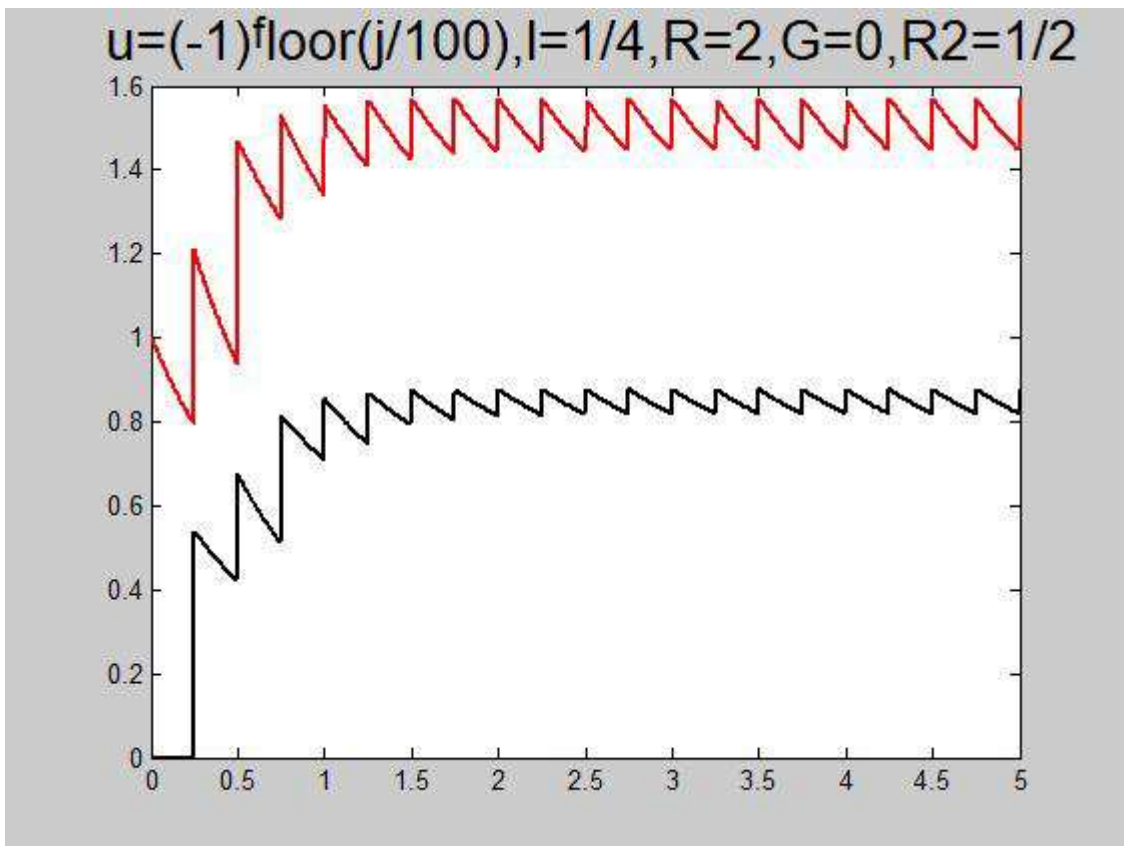
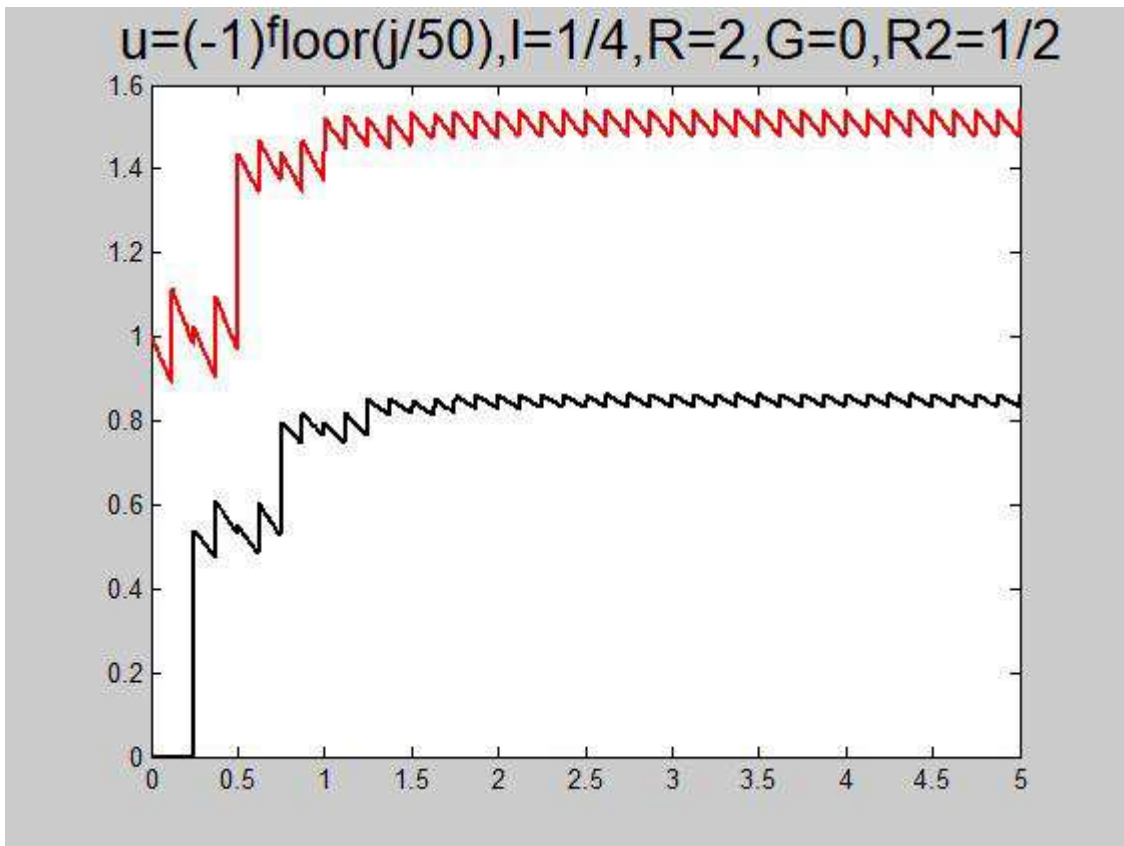
Таблица 1.10. Передаваемая в нагрузку $R_S = 1$ мощность и КПД в зависимости от периода изменения полярности источника тока $i(0, t) = \pm 1$ при $l = 1/4, R = 2, G = 0$.

P_0	P_1	КПД	Δ_S	Примечания
1.50	1.00	0.67	∞	max P_1
1.00	0.61	0.61	0.5	
1.00	0.61	0.61	1.0	
0.95	0.59	0.62	1.5	min P_1
0.99	0.63	0.63	2.0	

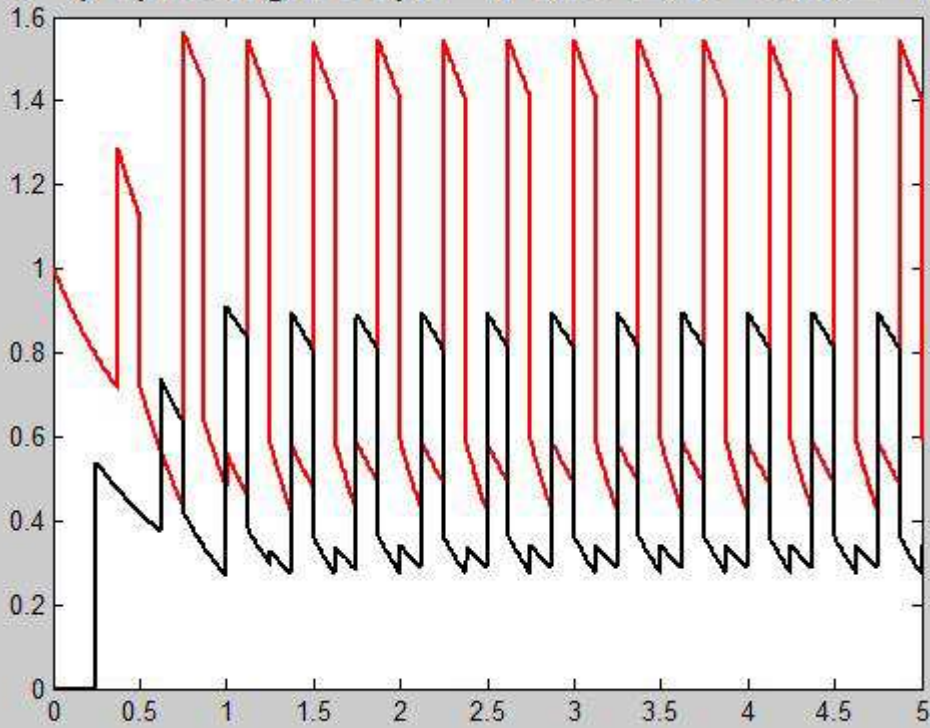
1.07	0.68	0.63	2.5	
1.12	0.71	0.64	3.0	
1.17	0.76	0.65	3.5	
1.21	0.78	0.61	4.0	

На рисунках представлена динамика изменения во времени генерируемой и передаваемой мощности вплоть до выхода на установившийся режим.

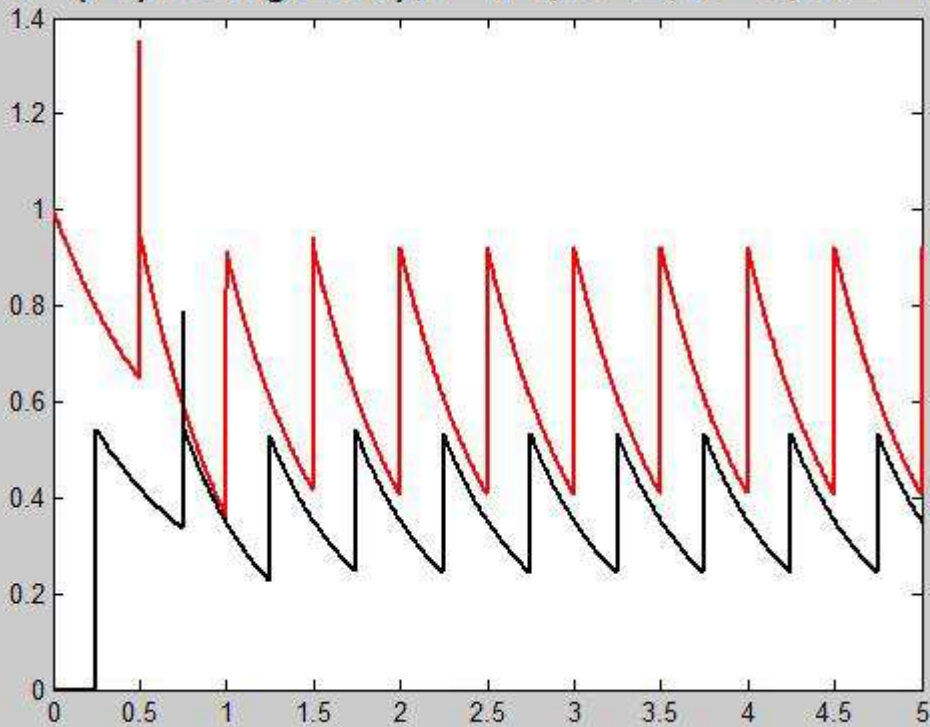




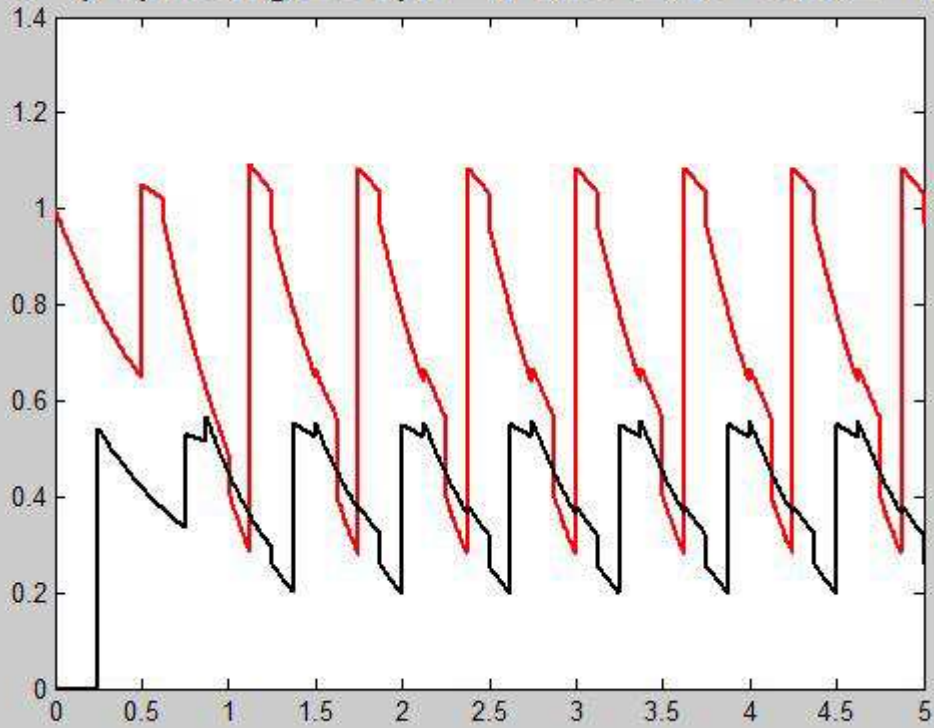
$$u = (-1)^{\text{floor}(j/150)}, l = 1/4, R = 2, G = 0, R2 = 1/2$$



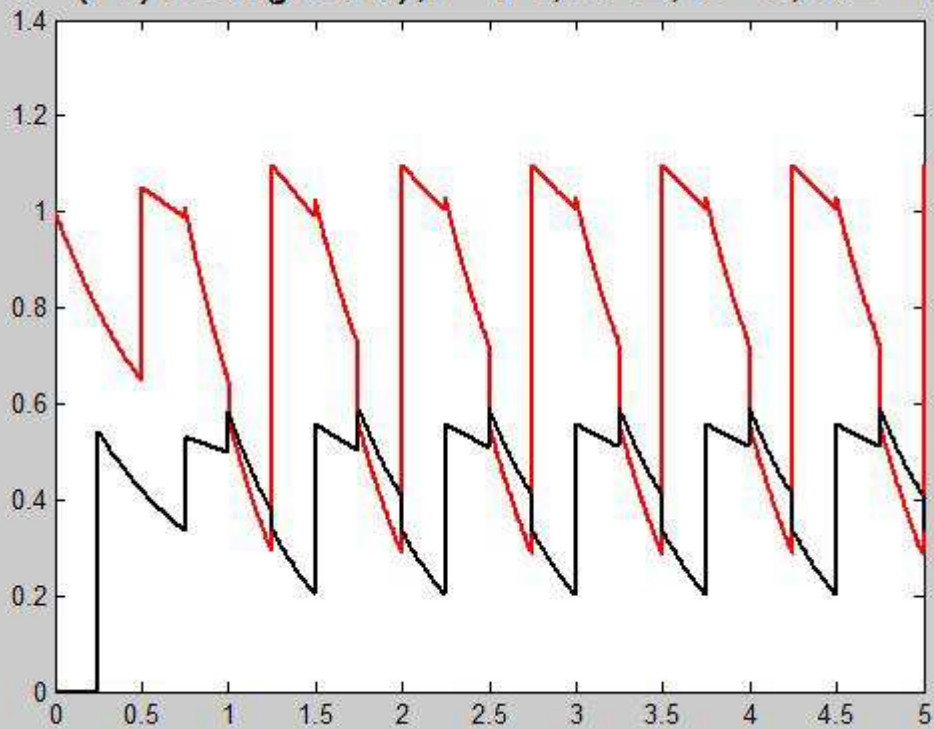
$$u = (-1)^{\text{floor}(j/200)}, l = 1/4, R = 2, G = 0, R2 = 1/2$$

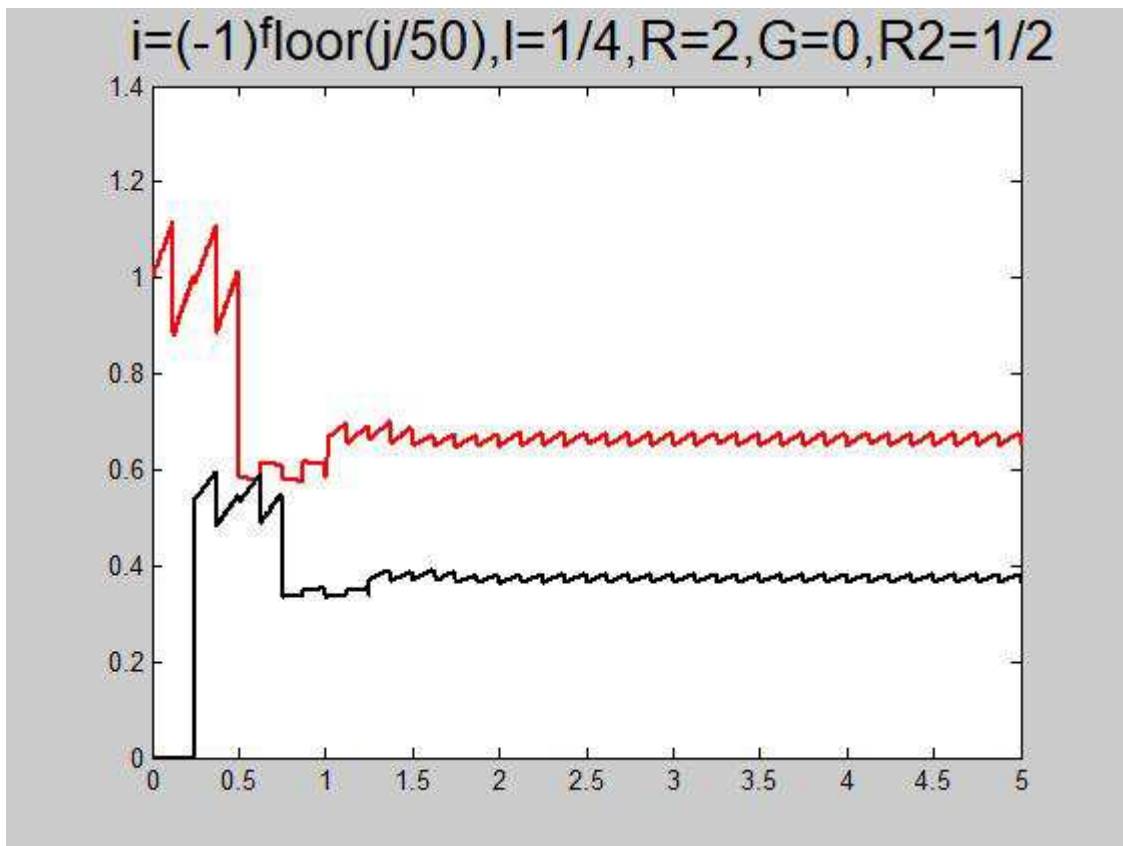
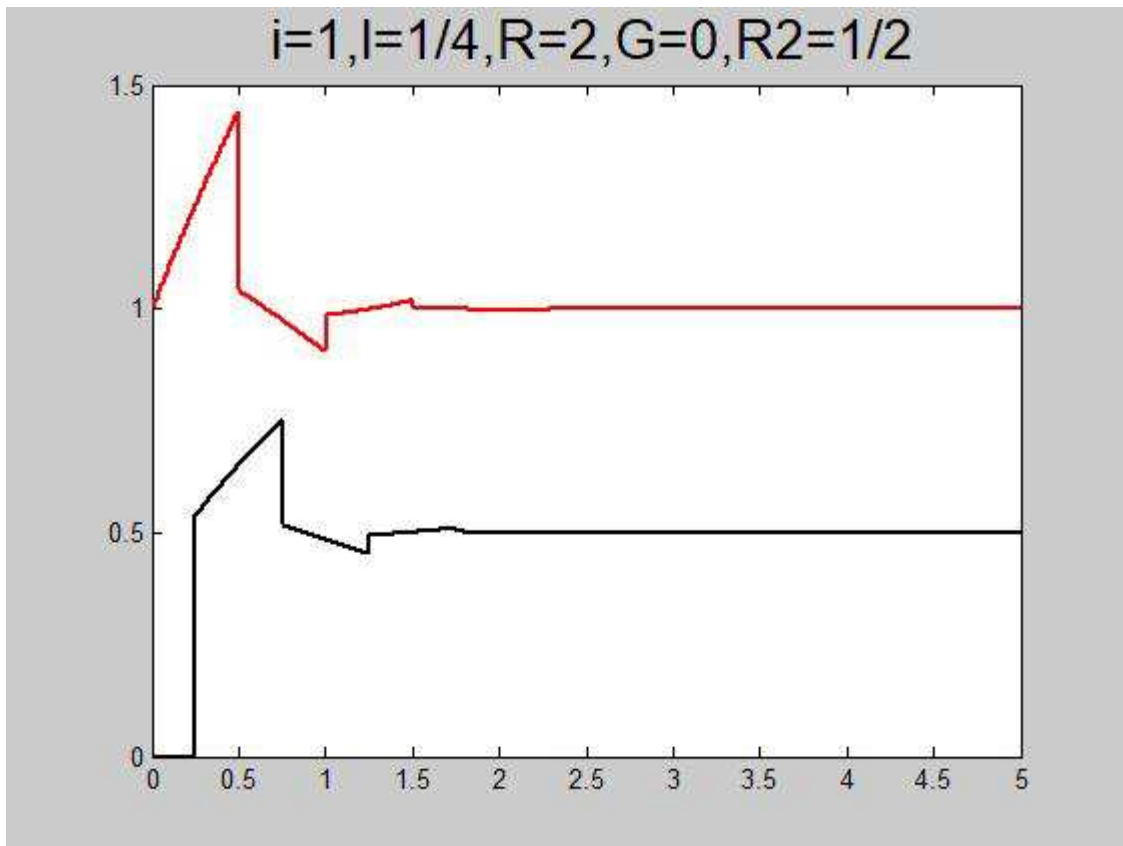


$$u = (-1)^{\text{floor}(j/250)}, l = 1/4, R = 2, G = 0, R2 = 1/2$$

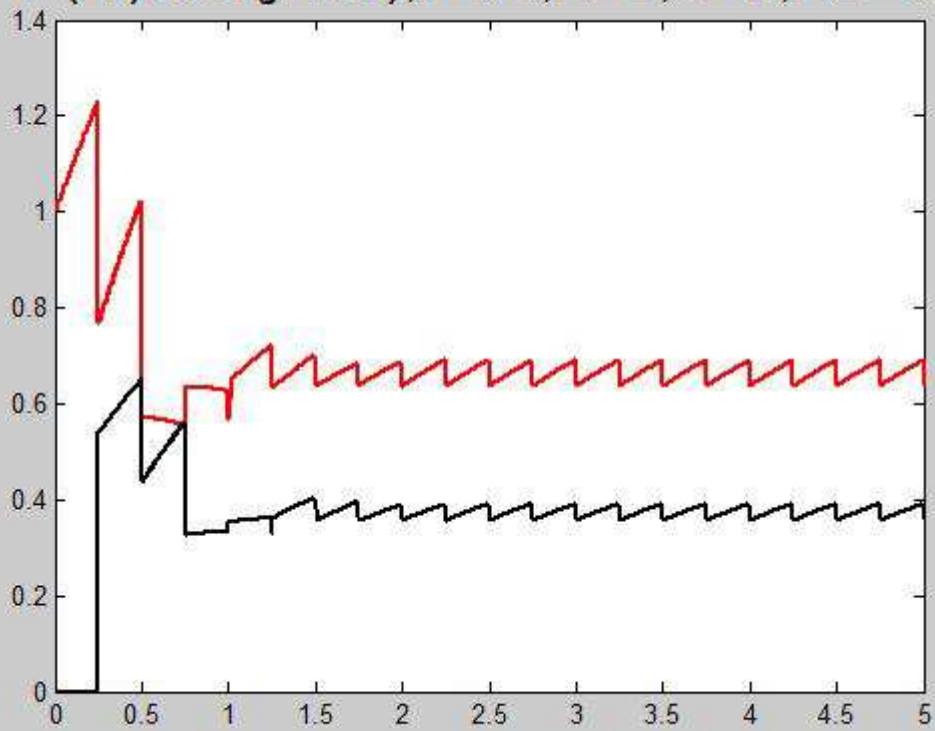


$$u = (-1)^{\text{floor}(j/300)}, l = 1/4, R = 2, G = 0, R2 = 1/2$$

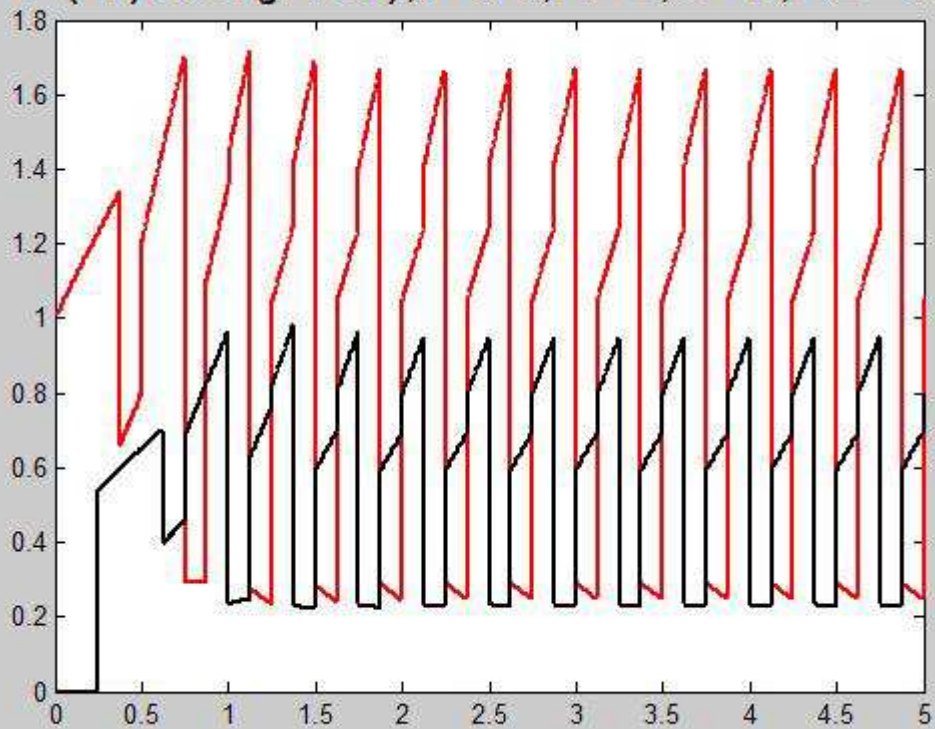




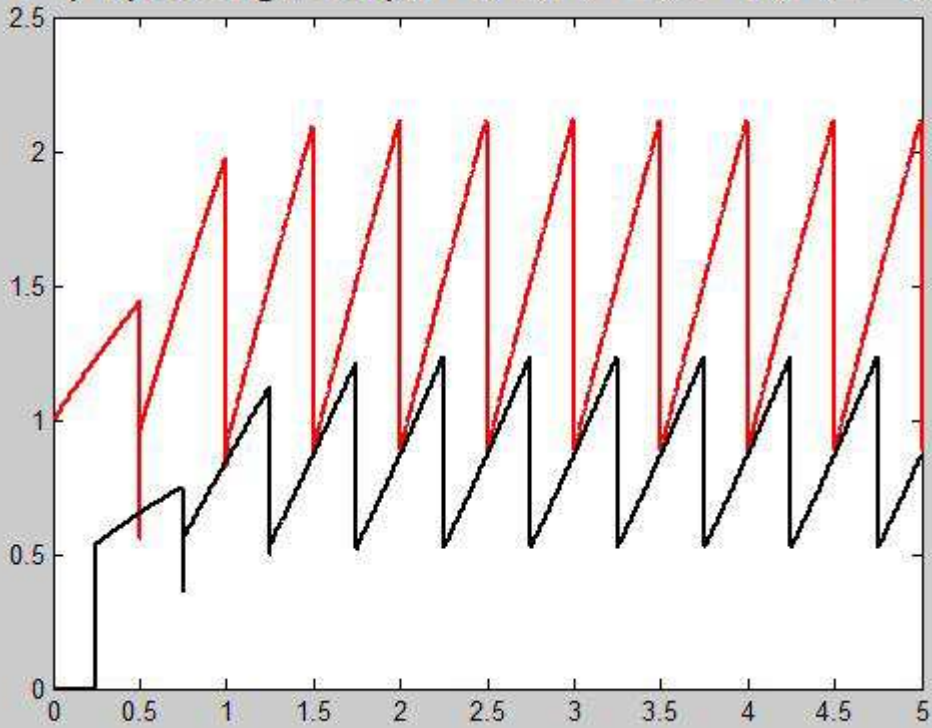
$$i = (-1)^{\text{floor}(j/100)}, l = 1/4, R = 2, G = 0, R2 = 1/2$$



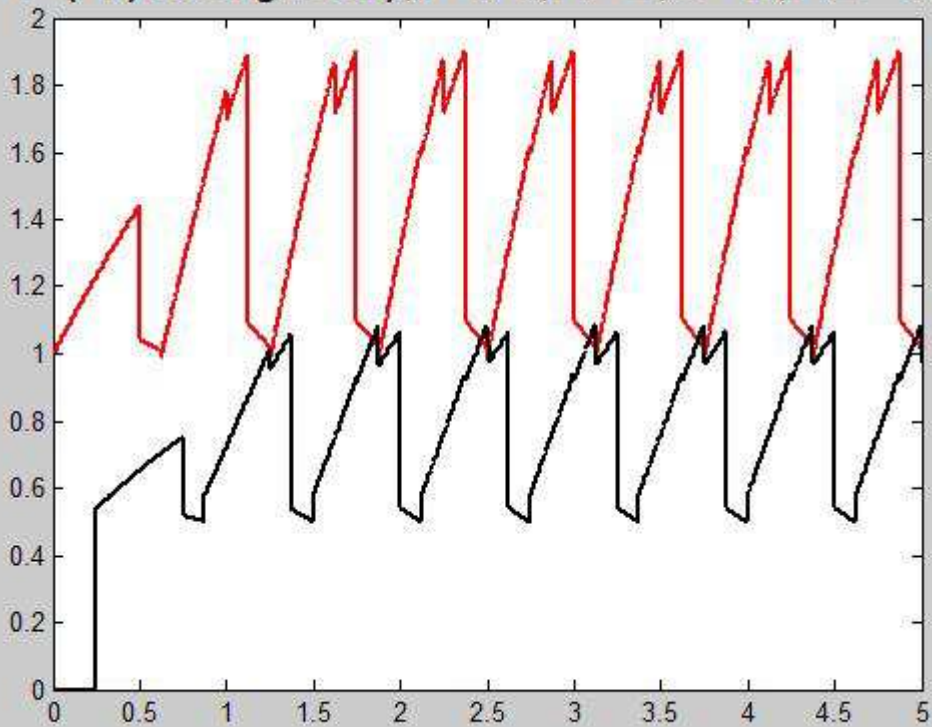
$$i = (-1)^{\text{floor}(j/150)}, l = 1/4, R = 2, G = 0, R2 = 1/2$$

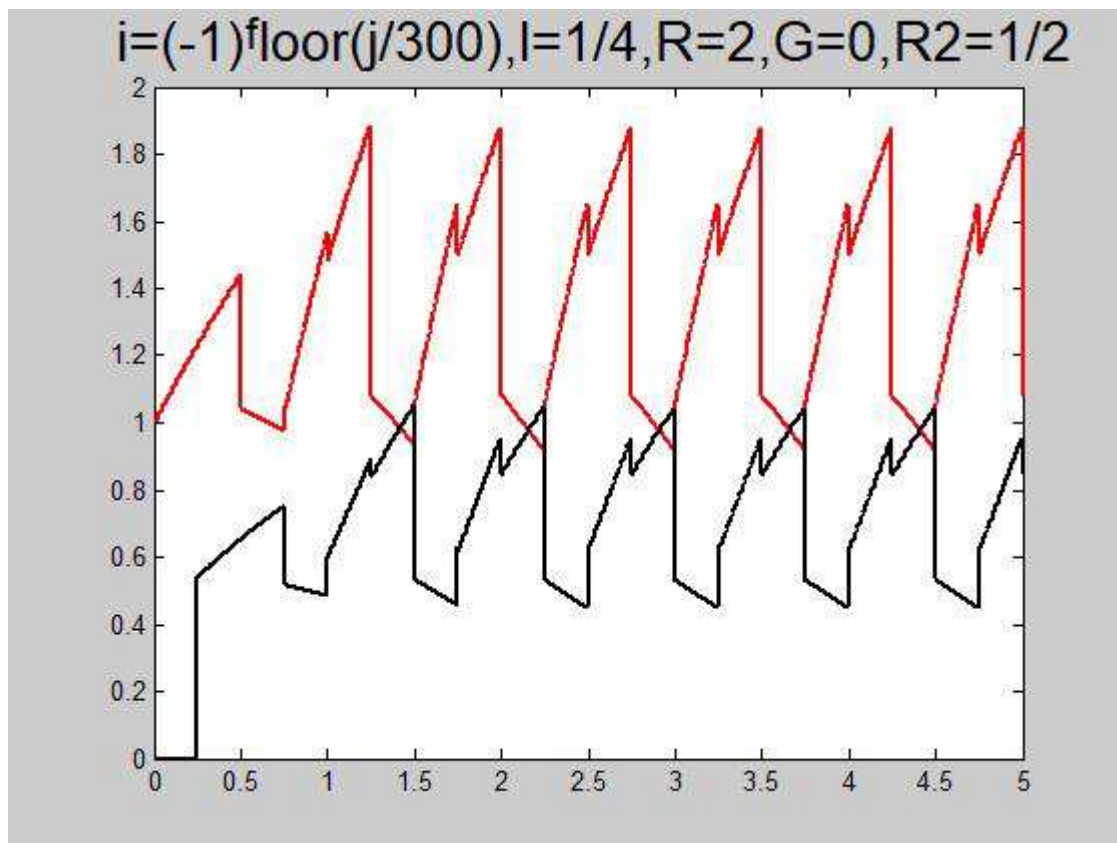


$$i = (-1)^{\text{floor}(j/200)}, l = 1/4, R = 2, G = 0, R2 = 1/2$$

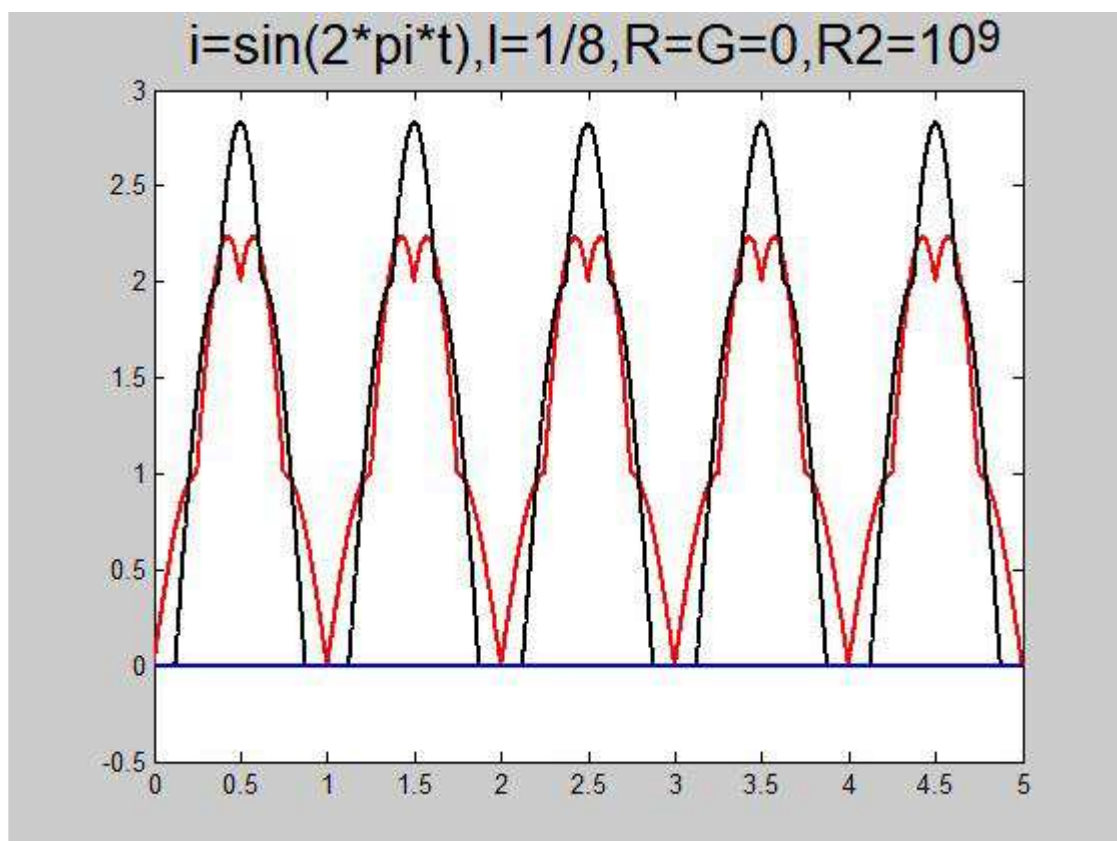


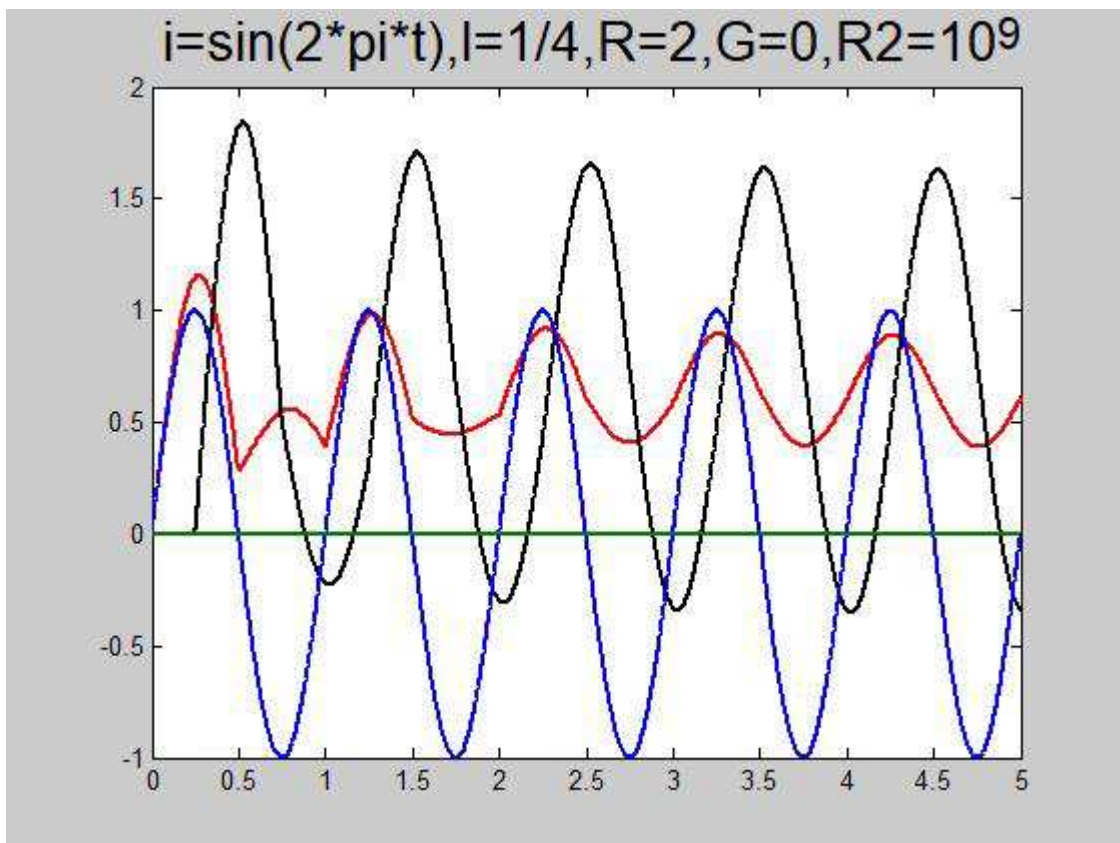
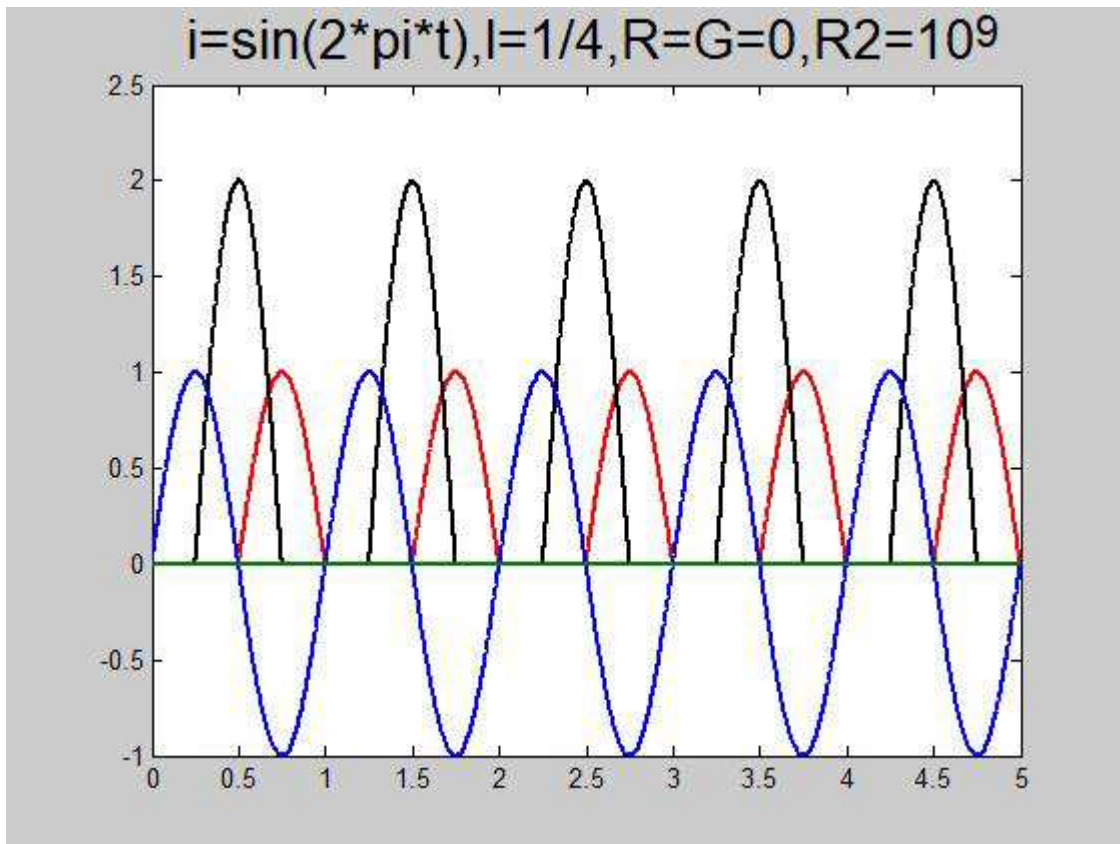
$$i = (-1)^{\text{floor}(j/250)}, l = 1/4, R = 2, G = 0, R2 = 1/2$$



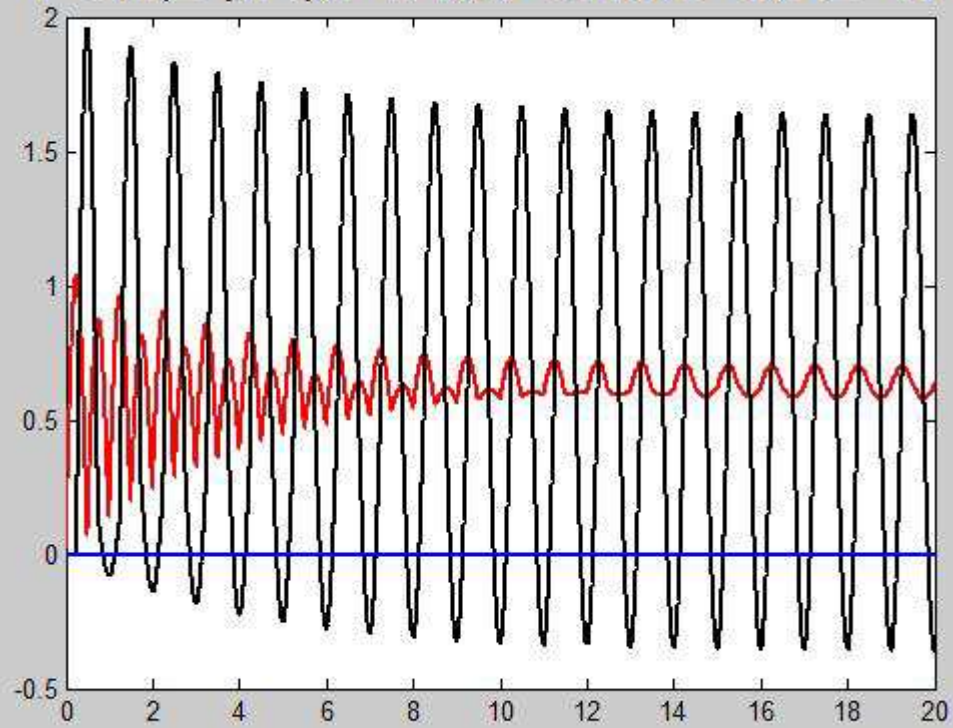


2. Несинусоидальные напряжения и токи

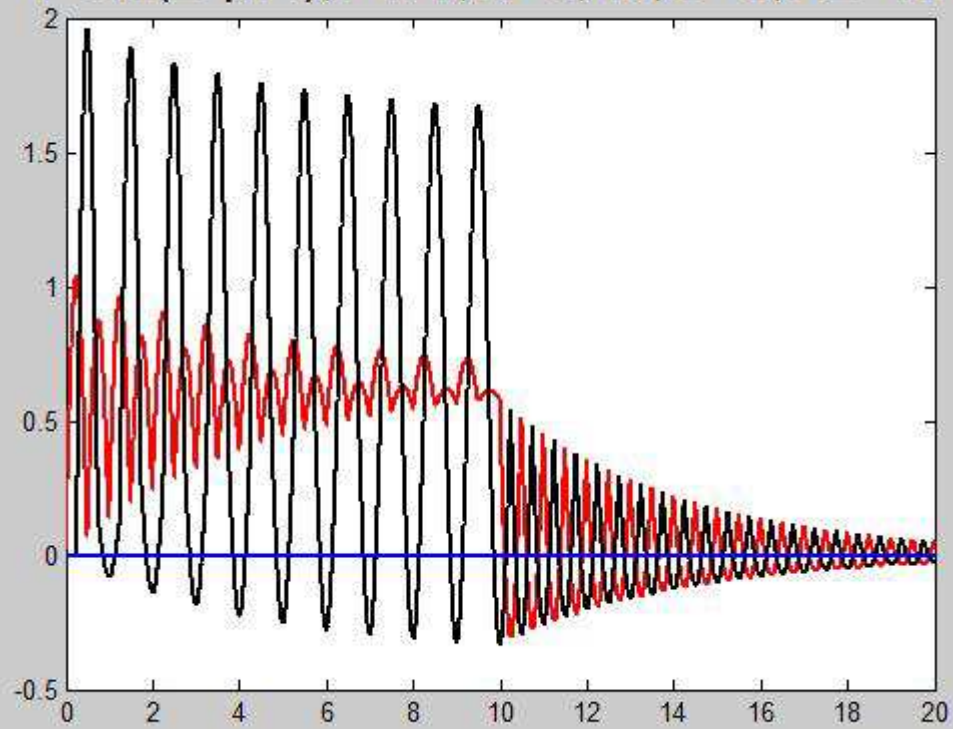




$$i = \sin(2 \cdot \pi \cdot t), l = 1/4, R = 0.48, G = 0, R2 = 10^9$$



$$i = \sin(2 \cdot \pi \cdot t), l = 1/4, R = 0.48, G = 0, R2 = 10^9$$



3. Волновое сопротивление трехфазной (многопроводной) линии.
4. Молниеотвод Франклина и клетка Фарадея
5. Эволюция и инволюция электромагнитных волн в линиях с произвольными потерями
-

ЛИТЕРАТУРА

1. **Круг К. А.** Основы электротехники. – Л.: ОНТИ, 1936. – 888 с.
2. **Круг К.А.** Переходные процессы в линейных электрических цепях. – М. – Л.: ГЭИ, 1948. – 344с.
3. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи /Учебник для ВТУЗов. – М.: Высшая школа, 1984. – 559с.
4. **Dragan G., Golovanov N., Mazzeti C., Moraru A., Nicoara B., Nucci C. A., Costea M., Dragan L. D.** Tehnica tensiunilor înalte. Vol. II. – Bucureşti: Editura AGIR, 2001. – 732p.
5. **Рыжов Ю. П.** Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для ВУЗов/Ю.П. Рыжов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.
6. **Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В.** Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. 5-е изд. Т. 2. – СПб.: Питер, 2009. – 432 с.
7. **Бортник И. М., Бурман А. П., Бутырин П. А.** и др. Основы современной энергетики. Т. 2. Современная электроэнергетика: учебник для вузов / под общ. ред. Е. В. Аметистова. – 5-е изд., стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 632 с.
8. **Берил С. И., Римский В. К., Алхазов А. Э.** PaPuRi - алгоритм, тесты, молниеотвод, шифратор (должен знать каждый выпускник технического вуза планеты). – Кишинев: РИЦ МолдГУ, 2018. – 264с.
9. **Топор Путина против циркуля и линейки. Видео 7.** - youtube.com
10. **Годунов С. К.** Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1979. – 392 с.