

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ  
ЭКСПОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ LC-ФИЛЬТРЫ**

**INVESTIGATION OF PERIODIC EXPOFUNCTIONAL  
SIGNALS PASSAGE THROUGH LC-FILTERS**

**Аннотация.** Исследованы переходные характеристики систем, содержащих различные LC-фильтры с потерями при экспофункциональном единичном скачке напряжения. Исследованы отклики систем, содержащих LC-фильтры с потерями при экспофункциональном воздействии на различные периодические сигналы. Проведенные исследования во временной области подтвердили факт компенсации потерь в LC-фильтрах при использовании экспофункциональных сигналов.

**Summary.** Transient characteristics of the systems, containing diverse LC-filters with losses under expofunctional voltage step, are investigated. Responses of the systems, containing LC-filters with losses at the expofunctional excitation, under diverse periodic signals are investigated. These investigations have proved the losses compensation fact in LC-filters at the use of expofunctional signals.

Известно [1], что наличие потерь в реактивных элементах LC-фильтров приводит к ухудшению избирательности фильтров. Поэтому компенсация потерь энергии сигнала в элементах фильтров способствует решению проблемы уменьшения затухания в полосе пропускания и улучшению избирательности LC-фильтров. Одним из способов улучшения избирательности LC-фильтров является сигнальный способ компенсации потерь электрической энергии в электрических цепях [2], в основу которого положено явление выделения активной мощности реактивными элементами при экспофункциональном воздействии [3]. Теоретическое обоснование указанного способа описано в [4] для сигналов с ограниченной длительностью и в [5] для сигналов с произвольной длительностью. В работе [6] показана возможность компенсации потерь в цепях первого порядка, содержащих реактивные элементы, при использовании периодических экспогармонических сигналов. В работе [7] показана возможность улучшения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) LC-фильтра нижних частот (ФНЧ) 3-го порядка с потерями при использовании периодических экспогармонических сигналов. Однако в литературе отсутствуют сведения об исследовании как переходных характеристик систем, содержащих различные LC-фильтры с потерями при экспофункциональных воздействиях, так и откликов различных LC-фильтров на периодические экспофункциональные сигналы. Поэтому целью данной статьи является исследование во временной области систем, содержащих различные LC-фильтры с потерями, при воздействии на данные фильтры экспофункционального единичного скачка и различных периодических экспофункциональных сигналов.

**1. Исследование переходных характеристик систем, содержащих различные LC-фильтры с потерями при экспофункциональном единичном скачке напряжения**

Данные исследования проведены в соответствии с алгоритмом, описанном в [8], с помощью устройства измерения АЧХ, подробно описанном в [7]. В качестве воздействия, прикладываемого к системе, использован единичный скачок напряжения [9].

Вначале исследуем переходную характеристику [9] системы, содержащей ФНЧ Чебышева 3-го порядка с потерями. Основные параметры фильтра [10]:

- полоса пропускания (ПП)  $0 \leq f \leq f_1$ ;
- граничная частота ПП  $f_1 = 10$  кГц;
- ослабление на частоте  $f_1$ ,  $a_1 = 3$  дБ;
- сопротивление источника и сопротивление нагрузки  $R_g = R_n = 1$  кОм.

Схема фильтра без потерь представлена на рис. 1.

Зададимся на граничной частоте  $f_1 = 10$  кГц, значениями добротностей катушек индуктивности и конденсаторов  $Q_L = Q_C = 30$ . Отсюда  $\lambda = \omega_1 / Q_L = 2128$  [8].

Введем в схему LC-фильтра сопротивления потерь катушек индуктивности  $R_k = \lambda L_k$  и конденсаторов  $R_k = 1 / (\lambda C_k)$ . Схема полученного фильтра с потерями представлена на рис. 2.

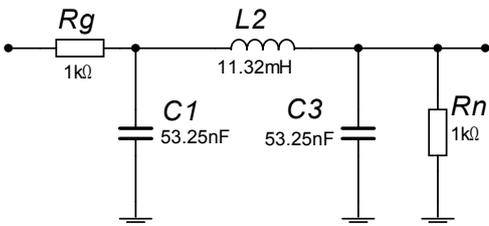


Рисунок 1 – Схема ФНЧ 3-го порядка без потерь

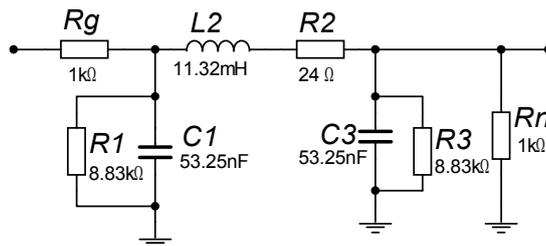


Рисунок 2 – Схема ФНЧ 3-го порядка с потерями

С помощью среды моделирования Multisim получены графики прикладываемых воздействий и откликов, представленные на рис. 3 ... 5.

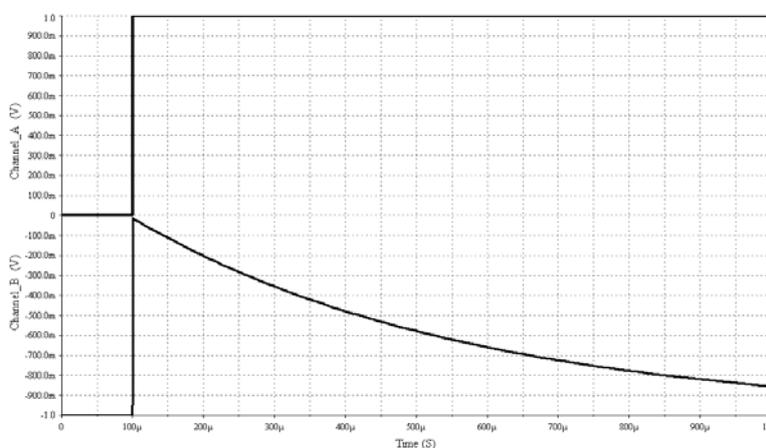


Рисунок 3 – Единичный скачок на входе системы (канал А), задающее экспофункциональное напряжение на входе ФНЧ с потерями (канал В, смещен вниз на 1 В)

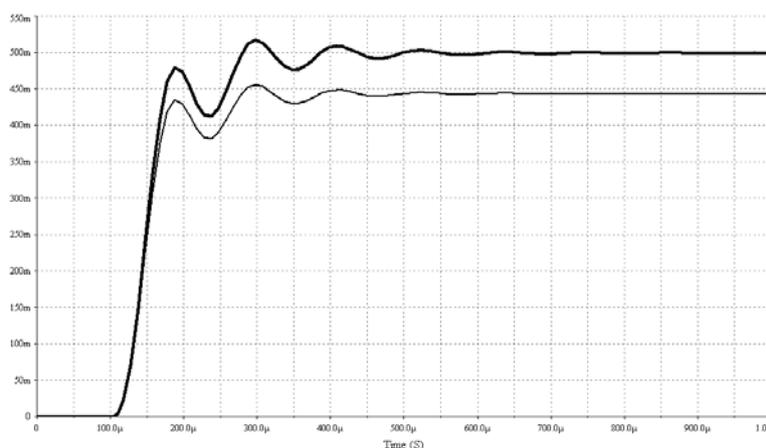


Рисунок 4 – Переходная характеристика ФНЧ без потерь (жирная линия), переходная характеристика ФНЧ с потерями (тонкая линия)

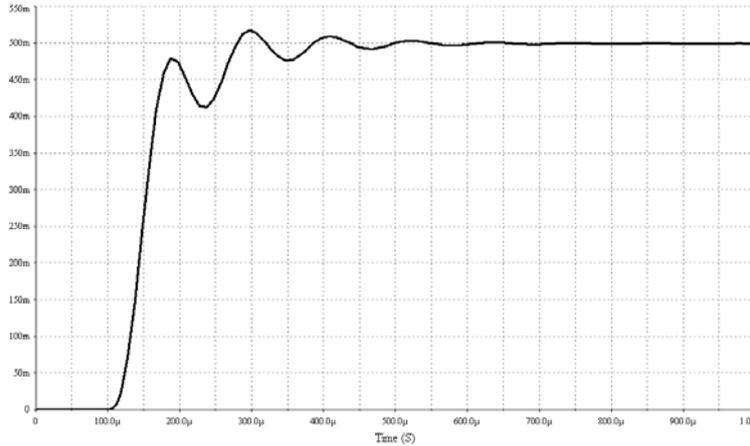


Рисунок 5 – Переходная характеристика системы, содержащей ФНЧ с потерями при экспофункциональном единичном скачке

Переходная характеристика системы, содержащей ФНЧ Чебышева 3-го порядка с потерями при экспофункциональном единичном скачке, также исследована с помощью макета, созданного в соответствии с [7]. Отличие результатов, полученных с помощью среды моделирования Multisim, от результатов, полученных с помощью собранного макета, составило 0,2 %. Удовлетворительное совпадение результатов дало возможность проводить исследования переходных характеристик других фильтров в среде моделирования Multisim.

Исследуем переходную характеристику системы, содержащей ПФ Баттерворта 8-го порядка с потерями. Основные параметры фильтра [10]:

- полоса пропускания (ПП)  $f_1 \leq f \leq f_2$ ;
- первая граничная частота ПП  $f_1 = 8$  кГц;
- вторая граничная частота ПП  $f_2 = 12,5$  кГц;
- ослабление на частотах  $f_1$  и  $f_2$ ,  $a_1 = a_2 = 3$  дБ;
- сопротивление источника и сопротивление нагрузки  $R_g = R_n = 1$  кОм.

Схема фильтра без потерь представлена на рис. 6.

Зададимся на граничной частоте  $f_1 = 10$  кГц значениями добротностей катушек индуктивности и конденсаторов  $Q_L = Q_C = 30$ . Отсюда  $\lambda = \omega_1 / Q_L = 2128$  [8]. Введем в схему LC-фильтра сопротивления потерь катушек индуктивности  $R_k = \lambda L_k$  и конденсаторов  $R_k = 1 / (\lambda C_k)$ .

Схема полученного фильтра с потерями представлена на рис. 7.

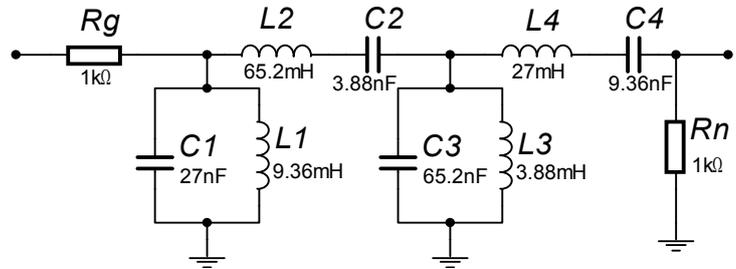


Рисунок 6 – Схема ПФ 8-го порядка без потерь

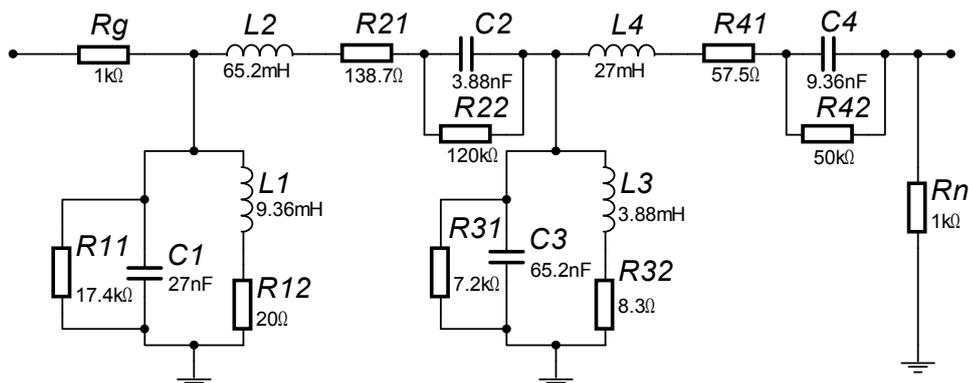


Рисунок 7 – Схема ПФ 8-го порядка с потерями

С помощью среды моделирования Multisim получены графики прикладываемых воздействий и откликов, представленные на рис. 8 ... 10.

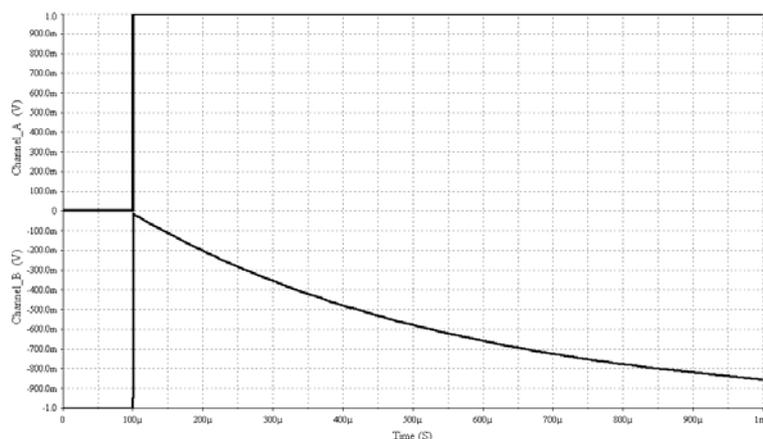


Рисунок 8 – Единичный скачок на входе системы (канал А), задающее экспофункциональное напряжение на входе ПФ с потерями (канал В, смещен вниз на 1 В)

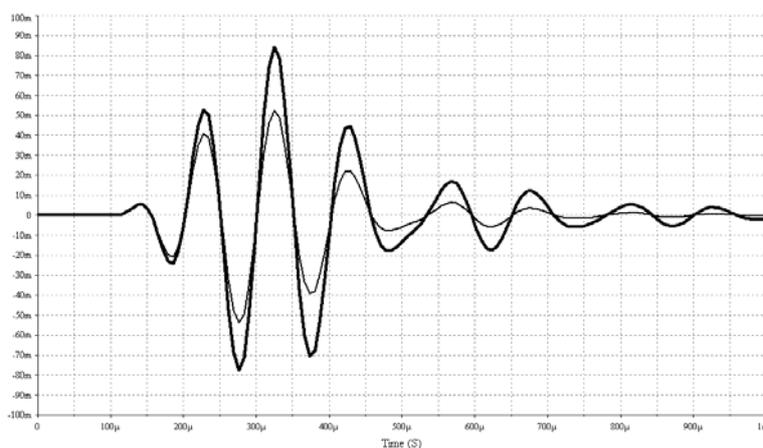


Рисунок 9 – Переходная характеристика ПФ без потерь (жирная линия), переходная характеристика ПФ с потерями (тонкая линия)

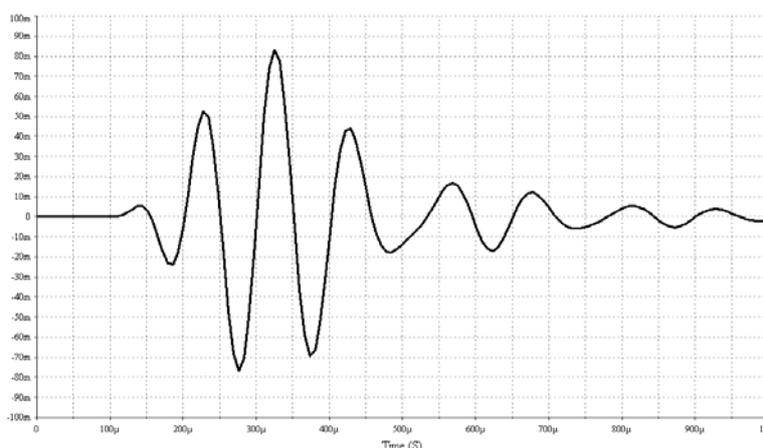


Рисунок 10 – Переходная характеристика системы, содержащей ПФ с потерями, при воздействии экспофункционального единичного скачка

При сравнении графика переходной характеристики на рис. 4 (жирная линия) с графиком переходной характеристики на рис. 5, а также графика на рис. 9 (жирная линия) с графиком на рис. 10 видно, что временные графики переходных характеристик систем, содержащих LC-фильтры с

потерями при экспофункциональном единичном скачке напряжения, практически совпадают с временными графиками переходных характеристик соответствующих LC-фильтров без потерь. Аналогичные результаты получены при исследовании с помощью среды Multisim переходных характеристик системы, содержащей ФНЧ Кауэра-Золотарева 6-го порядка с потерями [11].

## 2. Исследование откликов систем, содержащих LC-фильтры с потерями, при воздействии на данные системы различных испытательных периодических сигналов

Данные исследования проведены в соответствии с алгоритмом, описанном в [8], с помощью устройства измерения АЧХ, подробно описанном в [7]. В качестве испытательных сигналов использованы: периодическая последовательность прямоугольных импульсов, периодическая последовательность коротких прямоугольных импульсов, периодическая последовательность пилообразных импульсов, а также последовательность коротких прямоугольных импульсов, модулированная по гармоническому закону.

Исследуем отклики системы, содержащей ФНЧ Чебышева 3-го порядка с потерями, при воздействии различных периодических испытательных сигналов. С помощью среды моделирования Multisim получены графики прикладываемых воздействий и откликов, представленные на рис. 11 ... 18.

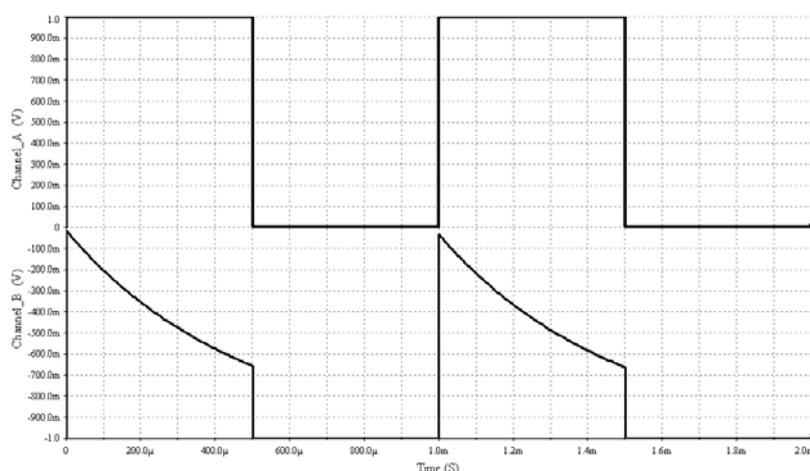


Рисунок 11 – Последовательность прямоугольных импульсов на входе системы (канал А), задающее экспофункциональное напряжение на входе фильтра с потерями (канал В, смещен вниз на 1 В)

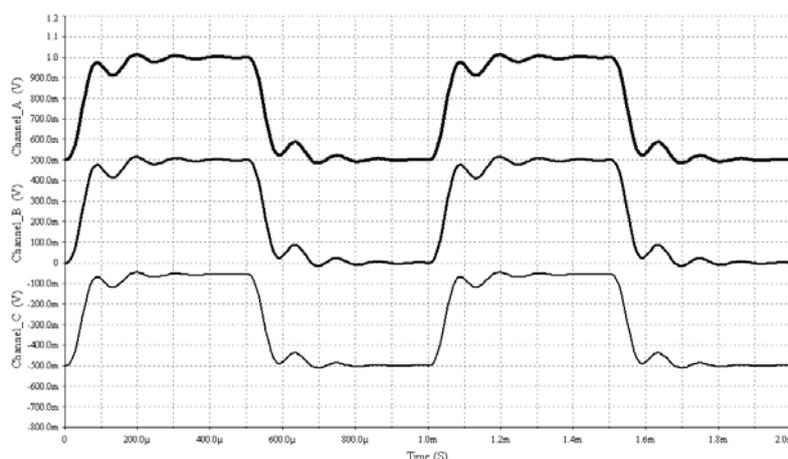


Рисунок 12 – Напряжение на выходе системы (канал А, смещен вверх на 0,5 В), отклик ФНЧ без потерь (канал В), отклик ФНЧ с потерями (канал С, смещен вниз на 0,5 В)

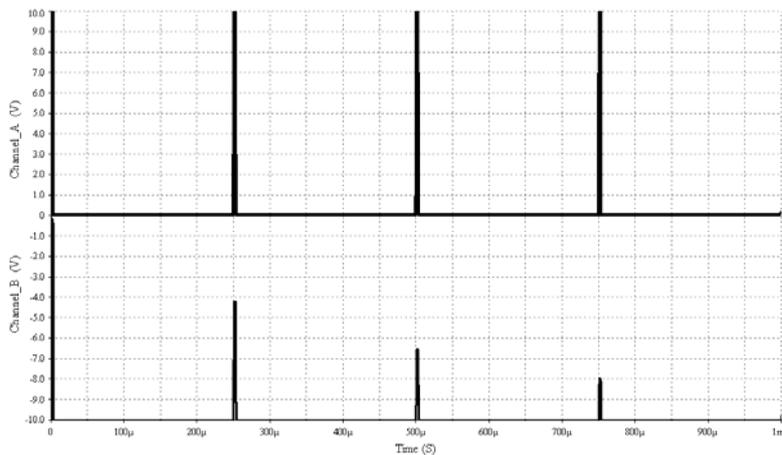


Рисунок 13 – Последовательность коротких импульсов на входе системы (канал А), задающее экспофункциональное напряжение на входе фильтра с потерями (канал В, смещен вниз на 10 В)

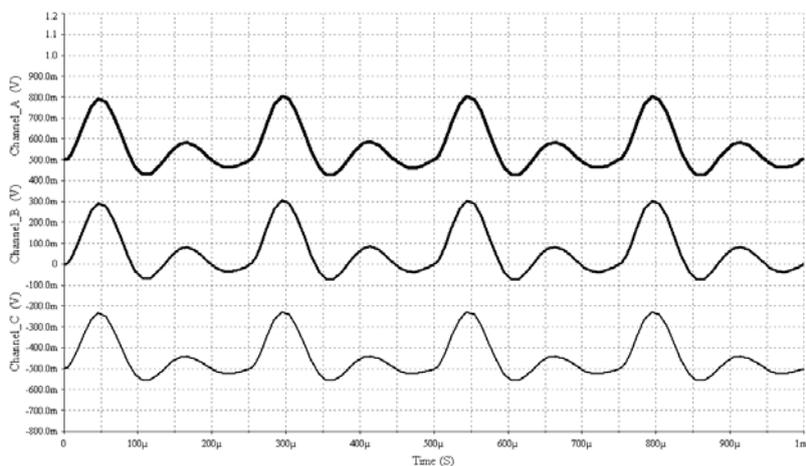


Рисунок 14 – Напряжение на выходе системы (канал А, смещен вверх на 0,5 В), отклик ФНЧ без потерь (канал В), отклик ФНЧ с потерями (канал С, смещен вниз на 0,5 В)

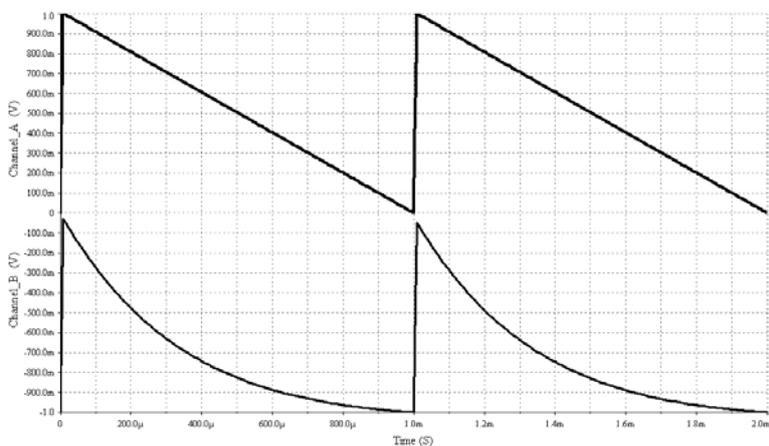


Рисунок 15 – Последовательность пилообразных импульсов на входе системы (канал А), задающее экспофункциональное напряжение на входе фильтра с потерями (канал В, смещен вниз на 1 В)

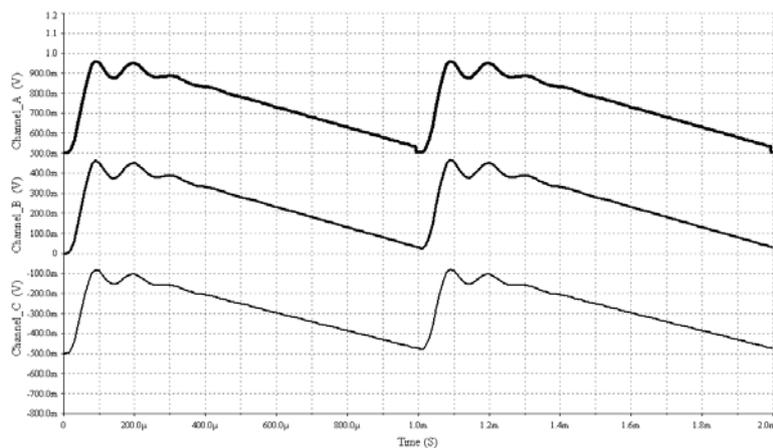


Рисунок 16 – Напряжение на выходе системы (канал А, смещен вверх на 0,5 В), отклик ФНЧ без потерь (канал В), отклик ФНЧ с потерями (канал С, смещен вниз на 0,5 В)

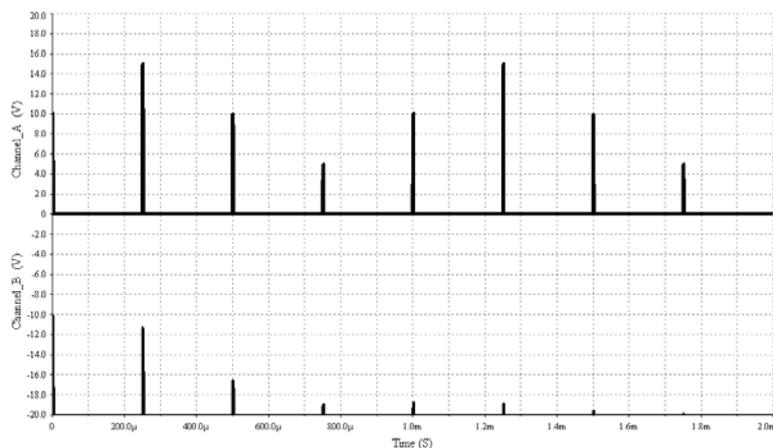


Рисунок 17 – Последовательность модулированных по гармоническому закону ( $U_m = 0,5$  В;  $f = 1$  кГц) коротких импульсов на входе системы (канал А), задающее экспофункциональное напряжение на входе фильтра с потерями (канал В, смещен вниз на 20 В)

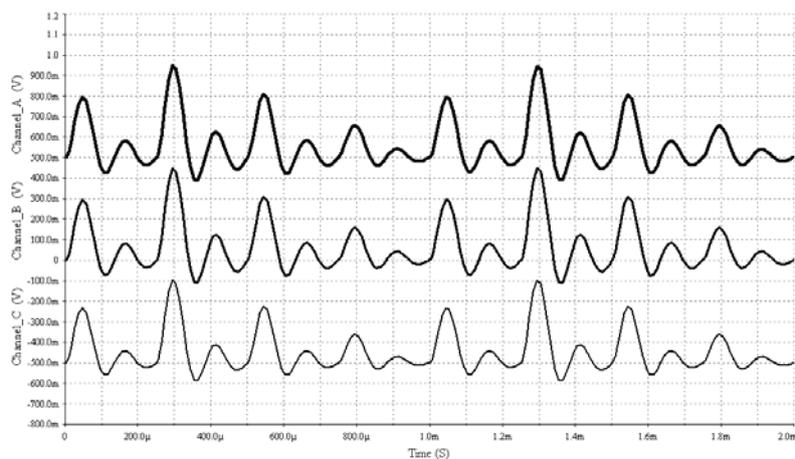


Рисунок 18 – Напряжение на выходе системы (канал А, смещен вверх на 0,5 В), отклик ФНЧ без потерь (канал В), отклик ФНЧ с потерями (канал С, смещен вниз на 0,5 В)

Отклики системы, содержащей ФНЧ Чебышева 3-го порядка с потерями при периодическом экспофункциональном воздействии, на последовательность прямоугольных импульсов и последовательность коротких импульсов также получены с помощью макета, созданного в соответствии с [7]. Отличие результатов, полученных с помощью среды моделирования Multisim, от результатов, полученных с помощью собранного макета, составило 0,2%. Удовлетворительное совпадение результатов дало возможность проводить исследования откликов других фильтров в среде моделирования Multisim.

Исследуем с помощью среды моделирования Multisim отклики системы, содержащей ПФ Баттерворта 8-го порядка с потерями при экспофункциональном воздействии, на те же самые испытательные сигналы. Полученные графики откликов на прикладываемые сигналы (см. рис. 11, 13, 15 и 17) представлены на рис. 19 ... 22 соответственно.

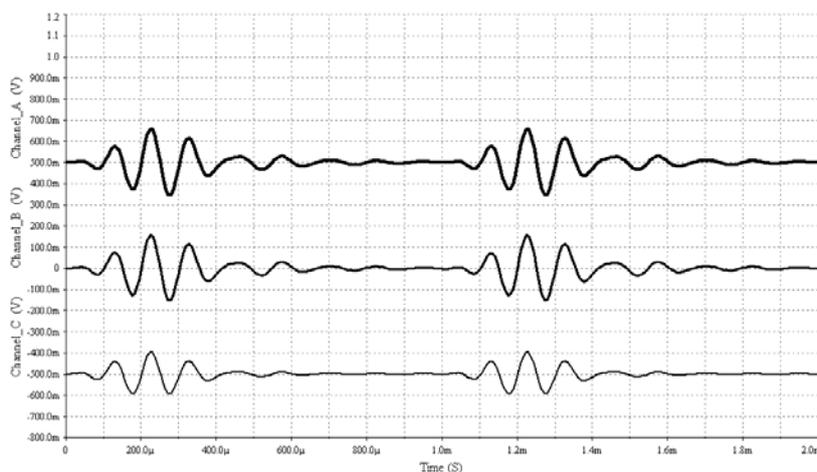


Рисунок 19 – Напряжение на выходе системы (канал А, смещен вверх на 0,5 В), отклик ПФ без потерь (канал В), отклик ПФ с потерями (канал С, смещен вниз на 0,5 В)

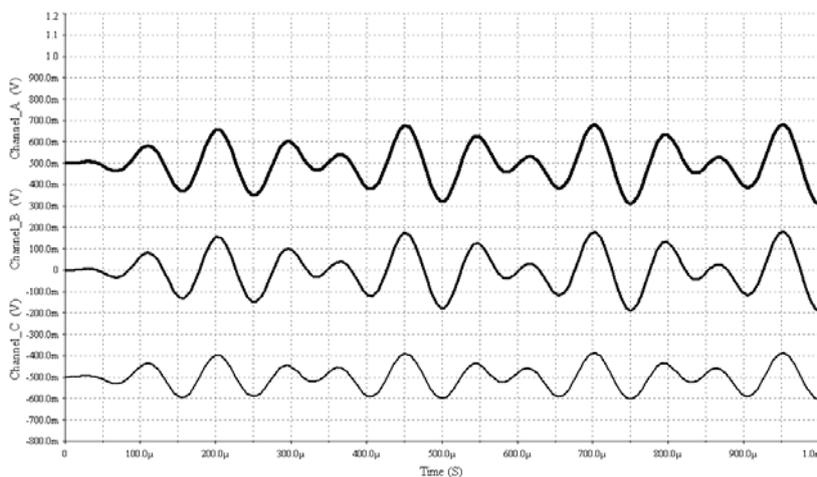


Рисунок 20 – Напряжение на выходе системы (канал А, смещен вверх на 0,5 В), отклик ПФ без потерь (канал В), отклик ПФ с потерями (канал С, смещен вниз на 0,5 В)

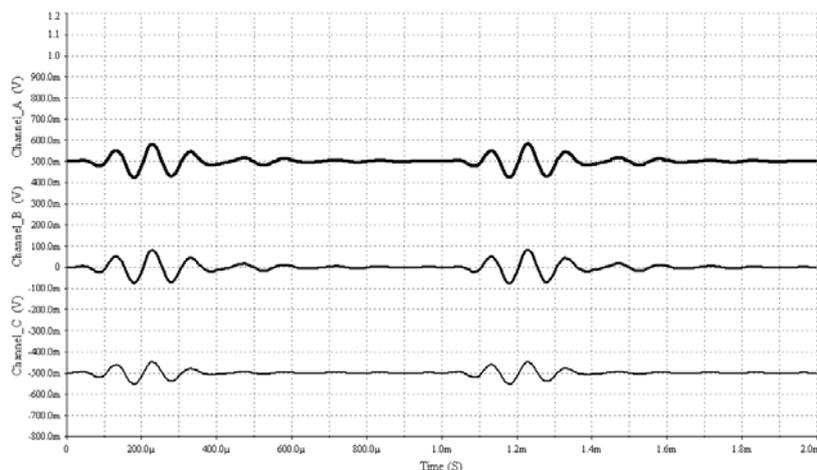


Рисунок 21 – Напряжение на выходе системы (канал А, смещен вверх на 0,5 В), отклик ПФ без потерь (канал В), отклик ПФ с потерями (канал С, смещен вниз на 0,5 В)

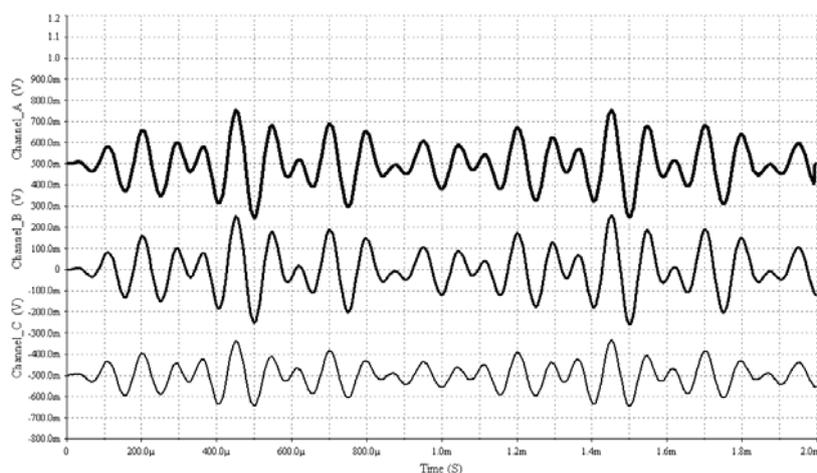


Рисунок 22 – Напряжение на выходе системы (канал А, смещен вверх на 0,5 В), отклик ПФ без потерь (канал В), отклик ПФ с потерями (канал С, смещен вниз на 0,5 В)

При сравнении графиков откликов канала А и канала В, представленных на рис. 12, 14, 16, 18 и 19 ... 22 видно, что графики откликов систем, содержащих LC-фильтры с потерями при периодических экспофункциональных воздействиях, практически совпадают с графиками откликов соответствующих LC-фильтров без потерь. Аналогичные результаты получены при исследовании с помощью среды Multisim откликов системы, содержащей ФНЧ Кауэра-Золотарева 6-го порядка с потерями [11].

Проанализируем полученные результаты. Из сравнения графиков переходных характеристик и откликов систем, содержащих LC-фильтры с потерями при экспофункциональном воздействии, с графиками переходных характеристик и откликов LC-фильтров без потерь следует, что переходные характеристики и отклики систем, содержащих различные LC-фильтры с потерями при экспофункциональном воздействии, приближаются к переходным характеристикам и откликам соответствующим им LC-фильтров без потерь. При этом, практически полностью совпадают формы откликов, мгновенные значения откликов и расположение их экстремумов. Это стало возможным вследствие увеличения добротностей катушек индуктивности и конденсаторов, т.е. благодаря компенсации потерь в реактивных элементах фильтров. Из этого следует, что существует возможность использования LC-фильтров с низкими добротностями при экспофункциональных воздействиях.

Таким образом, в данной работе проведено исследование переходных характеристик систем, содержащих различные LC-фильтры с потерями при экспофункциональном единичном скачке напряжения. Исследованы отклики систем, содержащих LC-фильтры с потерями при экспофункциональном воздействии, на различные периодические сигналы. Проведенные исследования во временной области подтвердили факт компенсации потерь в LC-фильтрах при использовании экспофункциональных сигналов. Данное явление может быть использовано для улучшения избирательности катушечно-конденсаторных фильтров.

### **Литература**

1. Ханзел Г.Е. Справочник по расчету фильтров. – М.: Советское радио, 1974. – 288 с.
2. Пат. 30905А Україна, МКИ Н03Н 7/03, Н03Н 11/06, Н02М 9/00. Сигнальний спосіб компенсації втрат електричної енергії в електричному колі: Пат. 30905А Україна, МКИ Н03Н 7/03, Н03Н 11/06, Н02М 9/00 А.М. Іваницький (Україна); – № 98063158; Заявл. 17.06.98; Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7 -11.
3. Іваницький А.М. Явище виділення активної потужності реактивними елементами електричного кола /Диплом на відкриття НВ №3, зареєстровано 12.01.99; пріоритет від 31.11.94// Винахідник України. – 1999. – №2; – 2000. – №1. – С. 121-126.
4. Іваницький А.М. Реактивні елементи при експофункциональних воздействиях // Информатика и связь: Сб. науч. тр. Укр. госуд. акад. связи им. А.С. Попова. – Одесса, 1996. – № 1. – С. 236 - 240.
5. Іваницький А.М. Компенсация потерь электрической энергии в электрической цепи при воздействии сигналов произвольной длительности // Наукові праці УДАЗ ім. О. С. Попова. – Одесса, 1999. – №1.– С. 50-52.
6. Іваницький А.М., Паску Д.Г. Исследование цепей первого порядка при периодическом экспофункциональном воздействии // Наукові праці ОНАС ім. О.С. Попова. – Одесса, 2004. – №3. – С. 40-45.
7. Іваницький А.М., Паску Д.Г. Устройство измерения амплитудно-частотных характеристик систем, содержащих реактивные элементы при периодических экспогармонических воздействиях // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2005. – № 2. – С. 66.
8. Іваницький А.М., Паску Д.Г., Катречко Е.Н. Амплитудно-частотные характеристики LC-фильтров высокого порядка при периодических экспогармонических сигналах // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2006. – № 1. – С. 80 - 86.
9. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 544 с.
10. Добротворский И.Н. Теория электрических цепей: Учебник для техникумов. – М.: Радио и связь, 1989. – 472 с.
11. Электрические цепи и электромагнитные поля при экспофункциональных воздействиях: Отчет о НИР (Заключ.) / Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова; № ГР 0105u007232. – Одесса, 2007. – 120 с.