

**УЛУЧШЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
LC-ФИЛЬТРОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА С ПОМОЩЬЮ ПЕРИОДИЧЕСКИХ
ЭКСПОГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

**IMPROVEMENT OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS
OF HIGH ORDER LC-FILTERS BY MEANS OF PERIODIC
EXPOHARMONICAL SIGNALS**

Аннотация. Улучшена амплитудно-частотная характеристика LC-фильтра нижних частот с потерями и полосового LC-фильтра с потерями с помощью применения периодических экспогармонических сигналов.

Summary. Amplitude-frequency characteristics of low-pass LC-filter with losses and band-pass LC-filter with losses is improved by means of using the periodic expoharmonical signals.

Главной причиной ограничения сверху рабочих частот любых фильтров являются потери в реактивных элементах [1]. Поэтому компенсация потерь энергии сигнала в элементах фильтров способствует решению проблемы повышения рабочих частот фильтров. Одним из способов является сигнальный способ компенсации потерь электрической энергии в электрических цепях [2, 3], в основу которого положено явление выделения активной мощности реактивными элементами при экспофункциональном воздействии [4]. Теоретическое обоснование указанного способа описано в [5] для сигналов с ограниченной длительностью и в [6] для сигналов с произвольной длительностью. В работах [7, 8] показана возможность компенсации потерь в цепях первого порядка, содержащих реактивные элементы, при использовании периодических экспогармонических сигналов. В работе [9] показана возможность улучшения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) LC-фильтра нижних частот (ФНЧ) третьего порядка с потерями при использовании периодических экспогармонических сигналов. Однако в литературе отсутствуют сведения о применении периодических экспогармонических сигналов для улучшения АЧХ LC-фильтров n -го порядка. Поэтому целью данной статьи является компенсация потерь в LC-фильтрах и повышение рабочих частот LC-фильтров n -го порядка с помощью периодических экспогармонических сигналов.

1. Исследование цепей n -го порядка в среде моделирования Multisim. Электрические RLC- цепи n -го порядка при экспофункциональных воздействиях, у которых, например, задающее напряжение источника напряжения имеет форму

$$e(t) = E_m e^{\pm \lambda t} \tilde{e}(t), \quad (1)$$

где $E_m > 0$; $\lambda > 0$; $\tilde{e}(t)$ – произвольная функция от времени t (включая обобщенную), не имеющая сомножителя $e^{\mp \lambda t}$, которую можно анализировать способом, описанным в [5]. Функция $\tilde{e}(t)$ названа в [10] ядром экспофункции $e(t)$. В силу доказанного в [5] свойства консервативности экспофункций, напряжение и токи в RLC-цепи при указанных воздействиях (1) являются так же экспофункциями с экспоненциальными множителями, совпадающими с экспоненциальным множителем воздействия. Для ядер экспофункций напряжений и токов схемы замещения индуктивности и емкости показаны на рис. 1,а и 1,б соответственно.

Из этих схем замещения следует, что для нижнего знака при λ происходит компенсация потерь в реактивных элементах RLC-цепи. Если стоит задача полной компенсации потерь во всех реактивных элементах цепи, то требуется, чтобы добротности всех катушек индуктивности и конденсаторов были равны между собой на заданной частоте. Действительно, добротность k -й катушки индуктивности на частоте ω равна

$$Q_{L_k} = \frac{\omega L_k}{R_k}, \quad (2)$$

где R_k – сопротивление потерь k -й катушки индуктивности;
 L_k – индуктивность k -й катушки индуктивности.

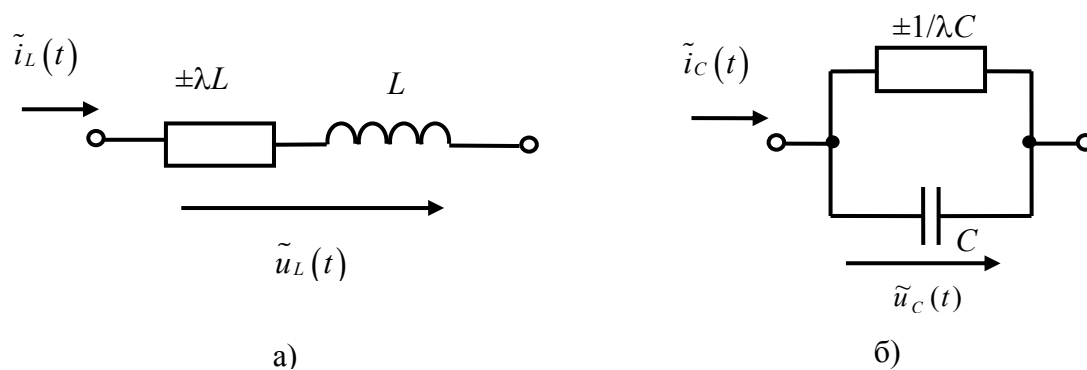


Рисунок 1 – Схемы замещения элементов электрической цепи

Для полной компенсации потерь необходимо выполнение условия [5]

$$R_k = \lambda L_k. \quad (3)$$

Подставим R_k из (3) в выражение для добротности (2). В результате получим

$$Q_{L_k} = \frac{\omega L_k}{\lambda L_k} = \frac{\omega}{\lambda}, \quad (4)$$

т.е. добротность катушки индуктивности не зависит от ее индуктивности, а зависит от частоты ω и величины λ , которые являются фиксированными величинами. Поэтому их отношение – величина постоянная. Аналогичная картина наблюдается и для добротности конденсаторов. Добротность k -го конденсатора на частоте ω при параллельном подключении сопротивления потерь R_k на частоте ω равна:

$$Q_{C_k} = \omega C_k R_k, \quad (5)$$

где C_k – емкость k -го конденсатора. Для полной компенсации потерь необходимо выполнение условия [5]

$$R_k = \frac{1}{\lambda C_k}. \quad (6)$$

Подставим R_k из (6) в выражение для добротности (5). Получим

$$Q_{C_k} = \frac{\omega C_k}{\lambda C_k} = \frac{\omega}{\lambda}, \quad (7)$$

т.е. добротность конденсатора не зависит от емкости конденсатора и совпадает с добротностью катушки индуктивности (4), что доказывает сделанное выше утверждение.

Опыт исследования цепей первого порядка при периодических экспогармонических сигналах [7, 8] показал, что даже для цепей первого порядка получают достаточно громоздкие аналитические выражения установившейся реакции цепи. Для цепей более высокого порядка при периодических экспогармонических сигналах сложность задачи многократно увеличивается. Поэтому для общего случая цепей n -го порядка реакцию цепи на периодическое экспогармоническое воздействие следует искать численными методами, используя среду моделирования Multisim. Исследование LC-фильтров высокого порядка можно вести по следующему алгоритму:

1. По заданным требованиям к АЧХ фильтра рассчитываем схему LC-фильтра известными методами.

2. Собираем схему LC-фильтра в среде моделирования Multisim, используя идеализированные элементы катушек индуктивностей и конденсаторов без потерь. С помощью измерителя АЧХ находим АЧХ LC-фильтра. Убеждаемся, что измеренная АЧХ фильтра удовлетворяет заданным требованиям.

3. Вводим в схему LC-фильтра сопротивления потерь катушек индуктивности и конденсаторов так, чтобы добротности всех катушек индуктивности и конденсаторов были равны между собой, используя формулы (3) и (6), а также (2) и (5). Определяем АЧХ полученного LC-фильтра с потерями.

4. С помощью устройства измерения АЧХ, подробно описанного в [9], производим измерение АЧХ системы, содержащей LC-фильтр с потерями, на заданных частотах. Убеждаемся в том, что АЧХ системы, содержащей LC-фильтр с потерями, совпадает с АЧХ LC-фильтра без потерь.

Данный алгоритм можно использовать для компенсации потерь и повышения рабочих частот LC-фильтров.

2. Улучшение АЧХ LC- фильтра высокого порядка. Рассчитан двусторонне нагруженный эллиптический LC-фильтр нижних частот со следующими характеристиками [11]:

- полоса пропускания (ПП) $0 \leq f \leq f_D = 10,4 \text{ кГц}$;
- максимальное значение затухания в ПП $a_D = 0,3 \text{ дБ}$;
- ослабление на частоте среза ($f_S = 15 \text{ кГц}$) $a_S = 70 \text{ дБ}$;
- сопротивление источника сигнала и нагрузки $R_g = R_n = 600 \text{ Ом}$.

Расчет фильтра проведен по методике, изложенной в [11]. Получен ФНЧ 7-го порядка, схема которого представлена на рис. 2.

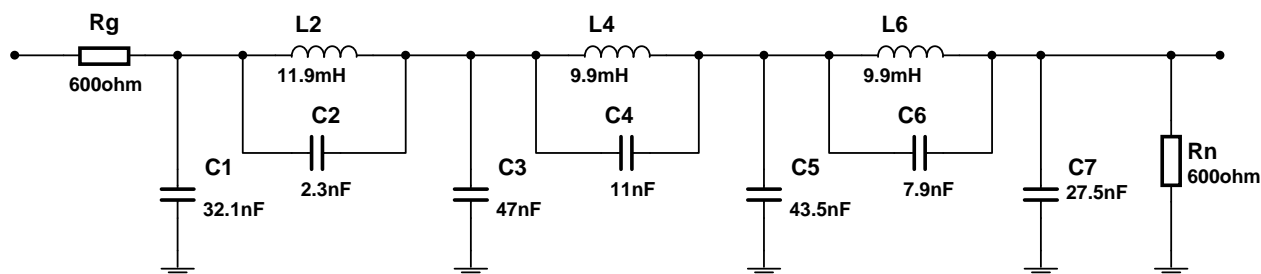


Рисунок 2 – Схема ФНЧ 7-го порядка без потерь

С помощью имеющегося в Multisim устройства измерения АЧХ (Bode Plotter) получен график АЧХ ФНЧ 7-го порядка без потерь при гармоническом воздействии (рис. 3).

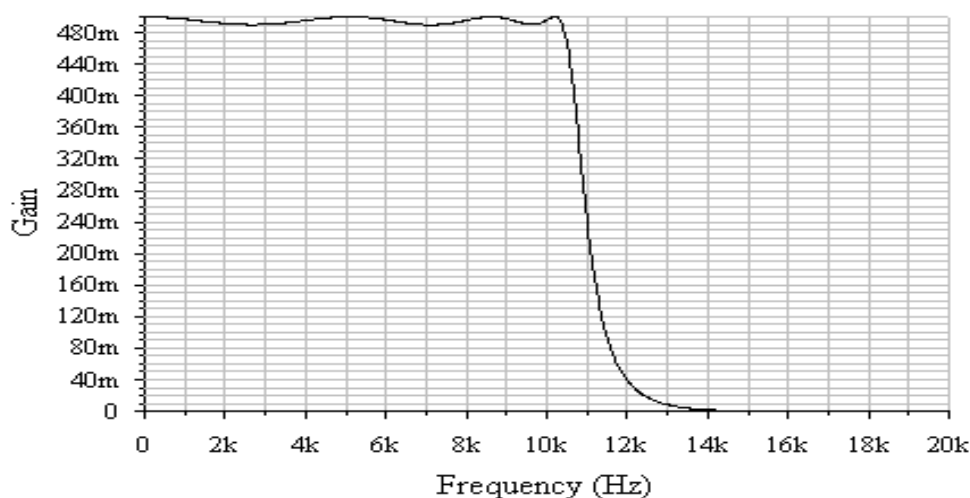


Рисунок 3 – АЧХ ФНЧ 7-го порядка без потерь

Введем в схему LC-фильтра сопротивления потерь катушек индуктивности и конденсаторов. Полученная схема фильтра с потерями представлена на рис. 4.

Приняв добротности всех катушек индуктивности и конденсаторов равными $Q_{L_k} = Q_{C_k} = 50$, из (4) и (7) определим значение величины λ

$$\lambda = \frac{\omega}{Q_{C_k}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 10,4 \cdot 10^3}{50} = 1311.$$

Зная λ , по выражениям (3) и (6) определим сопротивления потерь всех катушек индуктивности и конденсаторов: $R_1 = 23,8 \text{ кОм}$; $R_2 = 15,6 \text{ Ом}$; $R_3 = 331,6 \text{ кОм}$; $R_4 = 16,2 \text{ кОм}$, $R_5 = 13 \text{ Ом}$; $R_6 = 69,3 \text{ кОм}$; $R_7 = 17,5 \text{ кОм}$; $R_8 = 13 \text{ Ом}$; $R_9 = 97,2 \text{ кОм}$; $R_{10} = 27,7 \text{ кОм}$.

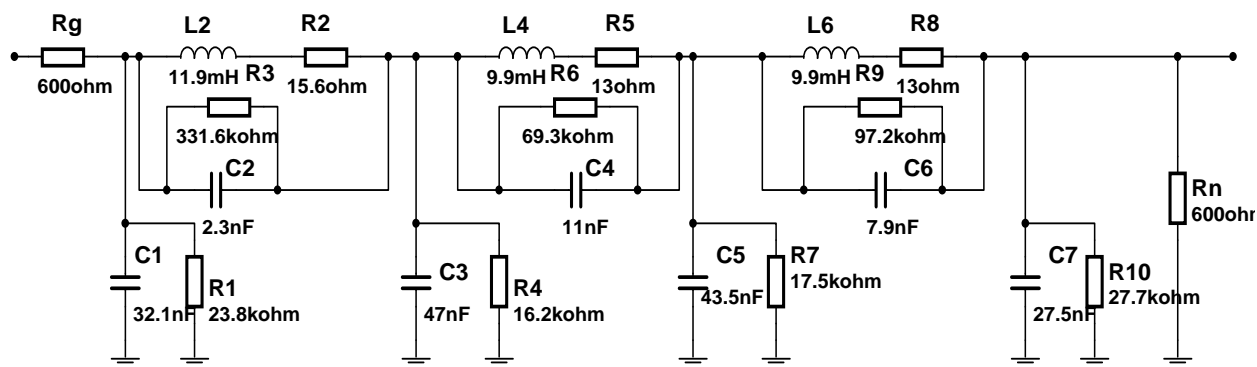


Рисунок 4 – Схема ФНЧ 7-го порядка с потерями

С помощью устройства измерения АЧХ измерим АЧХ ФНЧ с потерями (показана сплошной линией на рис. 5).

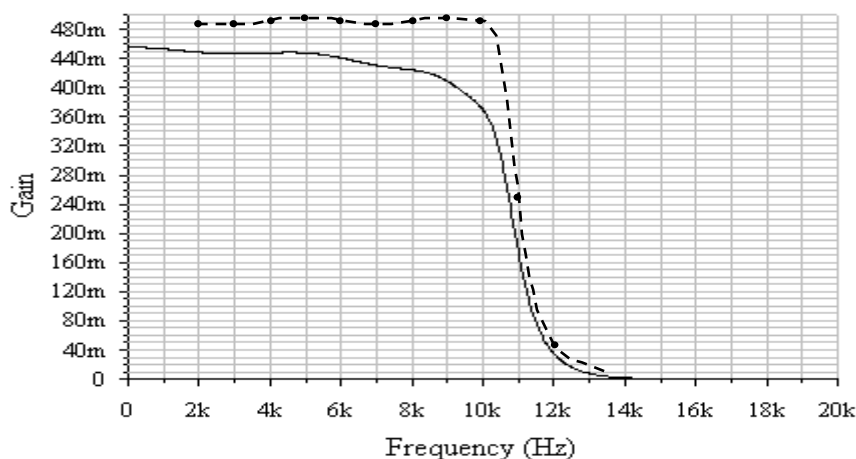


Рисунок 5 – АЧХ ФНЧ с потерями при гармоническом воздействии и ФНЧ с потерями при экспогармоническом воздействии

Определим значение $\tau = 1/\lambda = 0,763$ мс. Значение τ необходимо знать для расчета элементов интегрирующих RC-цепей в формирователях периодической последовательности импульсов вида $Ue^{-\lambda t}$ [9]. Приняв значение $R_{14} = R_{18} = 100$ кОм, получим, что $C_5 = C_{10} = 7,63$ нФ.

С помощью устройства измерения АЧХ, описанного в [9], производим измерение АЧХ системы, содержащей ФНЧ с потерями при экспогармоническом воздействии (показана пунктиром на рис. 5).

3. Расчет LC-аналога пьезокерамического фильтра. В приемопередающей аппаратуре нашли применение высокочастотные пьезокерамические фильтры, работающие на частоте 100 кГц, выполненные по лестничной схеме (рис. 6).

Задавшись требованиями, предъявляемым к полосовому (ПФ) пьезокерамическому фильтру, произведем расчет полосового LC-фильтра с аналогичными характеристиками и исследуем возможность повышения рабочей частоты такого фильтра до 128 кГц. Эскиз требований к частотной характеристике полосового фильтра представлен на рис. 7.

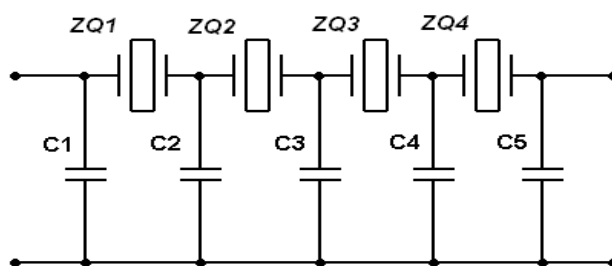


Рисунок 6 – Полосовой пьезокерамический фильтр

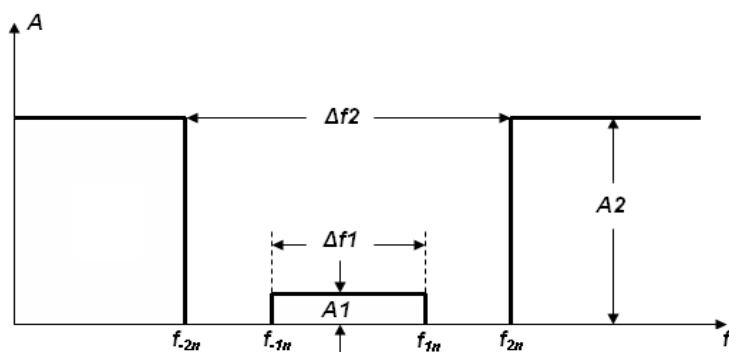


Рисунок 7 – Эскиз требований к амплитудно-частотной характеристике рабочего ослабления ПФ

Значения исходных данных этого фильтра следующие:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 0,028 \text{ дБ}, & A_2 &= 45,2 \text{ дБ}; \\
 f_{-2n} &= 113,1 \text{ кГц}, & f_{-1n} &= 123,1 \text{ кГц}; \\
 f_{1n} &= 132,9 \text{ кГц}, & f_{2n} &= 142,9 \text{ кГц}; R_1 = R_2 = 1000 \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

Расчет полосового фильтра, работающего на средней частоте 128 кГц, произведен по методике, изложенной в [12]. Получим полосовой LC-фильтр со следующими значениями элементов:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 10,647 \text{ нФ}, & L_1 &= 0,1452 \text{ мГн}, \\
 C_2 &= 2,262 \text{ нФ}, & L_2 &= 0,5308 \text{ мГн}, \\
 C_3 &= 2,913 \text{ нФ}, & L_3 &= 0,6835 \text{ мГн}, \\
 C_4 &= 20,069 \text{ нФ}, & L_4 &= 0,077 \text{ мГн}, \\
 C_5 &= 0,1304 \text{ нФ}, & L_5 &= 11,9 \text{ мГн}.
 \end{aligned}$$

Схема рассчитанного ПФ представлена на рис. 8.

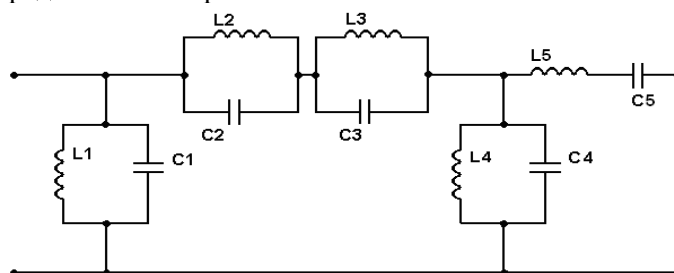


Рисунок 8 – Схема полосового LC-фильтра

С помощью устройства измерения АЧХ получим график АЧХ ПФ без потерь (рис. 9).

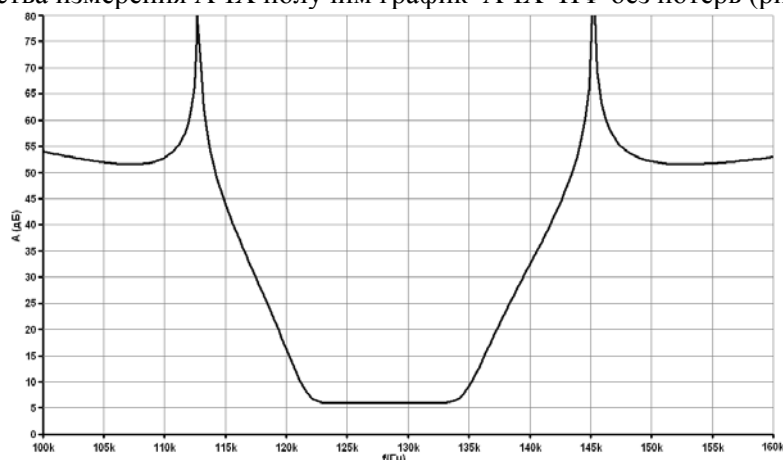


Рисунок 9 – АЧХ ПФ без потерь при гармоническом воздействии

Найдем минимальную добротность, которой должны обладать элементы рассчитанного фильтра, по формуле $Q \geq 25 \frac{f_0}{f_{1n} - f_{-1n}}$.

Отсюда следует, что $Q = 25 \frac{127,95 \cdot 10^3}{132,9 \cdot 10^3 - 123,1 \cdot 10^3} = 327$.

Полученное значение Q трудно реализуемо на практике. При физической реализации фильтров необходимо учитывать потери в реактивных элементах. Введем в схему ПФ сопротивления потерь катушек индуктивности и конденсаторов. Полученная схема фильтра с потерями представлена на рис. 10.

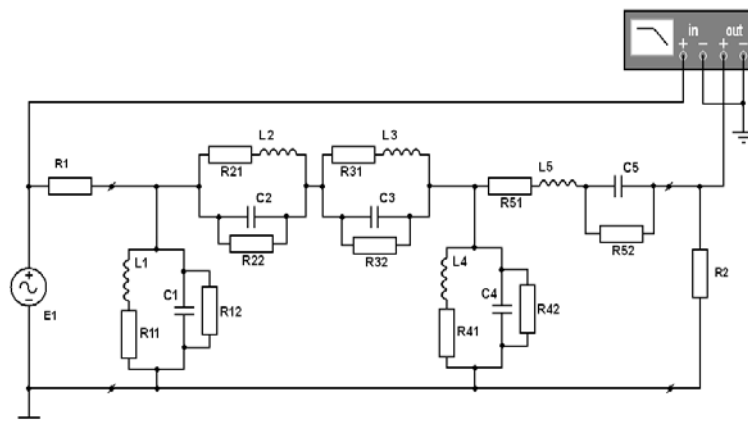


Рисунок 10 – Схема для снятия АЧХ ПФ с потерями

Приняв добротности всех катушек индуктивности и конденсаторов равными $Q_{L_k} = Q_{C_k} = 50$, из (4) и (7) определим значение величины λ

$$\lambda = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{2\pi f_0}{Q}; \quad \lambda = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 128 \cdot 10^3}{50} = 1,61 \cdot 10^4.$$

Зная λ , по выражениям (3) и (6) определим сопротивления потерь всех катушек индуктивности и конденсаторов (рис. 10): $R_{11} = 2,4 \text{ Ом}; R_{12} = 5,8 \text{ кОм}; R_{21} = 8,5 \text{ Ом}; R_{22} = 27,5 \text{ кОм}; R_{31} = 11 \text{ Ом}; R_{32} = 21,3 \text{ кОм}; R_{41} = 1,3 \text{ Ом}; R_{42} = 3,1 \text{ кОм}; R_{51} = 191,6 \text{ Ом}; R_{52} = 477,8 \text{ кОм}$.

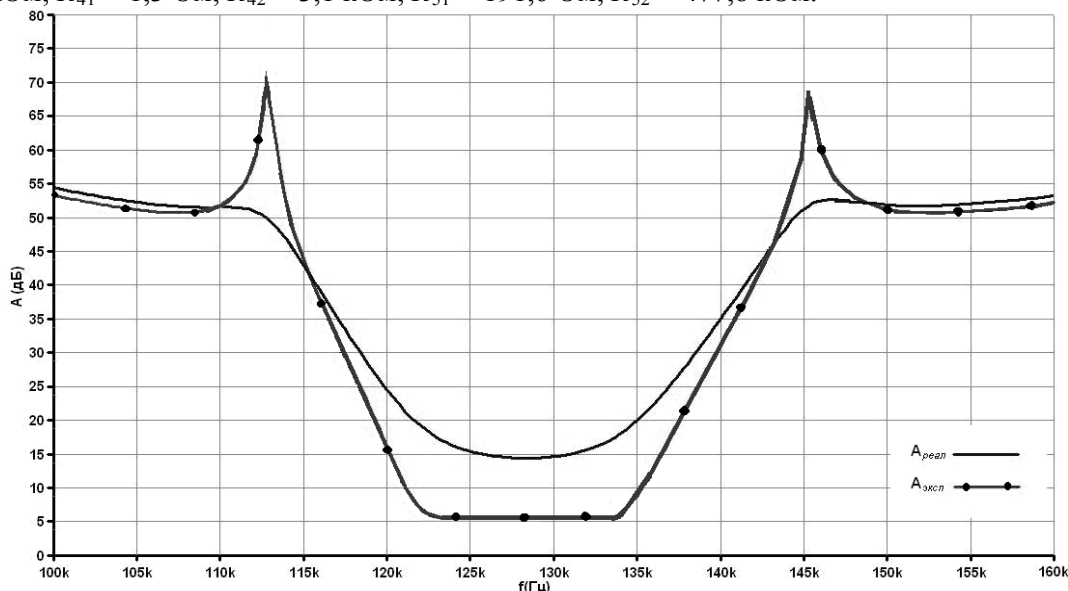


Рисунок 11 – АЧХ ПФ с потерями при гармоническом воздействии и ПФ с потерями при экспогармоническом воздействии

С помощью устройства измерения АЧХ, измерим АЧХ ПФ с потерями (рис. 11). С помощью устройства измерения АЧХ, описанного в [9], производим измерение по отсчетам АЧХ системы, содержащей ПФ с потерями, при экспогармоническом воздействии. На рис. 11 для сравнения

представлены графики АЧХ ПФ с потерями при гармоническом воздействии (сплошная линия) и АЧХ ПФ с потерями при экспогармоническом воздействии (линия, построенная по точкам).

Проанализируем полученные результаты. Из сравнения графиков АЧХ на рис. 5 и 11 следует, что амплитудно-частотные характеристики ФНЧ и полосового LC-фильтра с потерями приближаются к амплитудно-частотным характеристикам идеального ФНЧ и идеального полосового LC-фильтра. При этом, совпадают характерные частоты фильтров, полосы пропускания и полосы задерживания. Ослабление в полосах пропускания фильтров при экспогармоническом воздействии удовлетворяет требованиям. Это стало возможным вследствие увеличения добротностей катушек индуктивности и конденсаторов, т.е. при компенсации потерь в реактивных элементах фильтров. Из этого следует, что существует возможность использования LC-фильтров с низкими добротностями при экспогармонических воздействиях. Получаемые при этом амплитудно-частотные характеристики удовлетворяют требованиям, предъявляемым к фильтрам. Увеличение добротностей катушек индуктивности и конденсаторов дает возможность повышать рабочие частоты катушечно-конденсаторных фильтров.

В заключение отметим, что в данной работе проведено измерение амплитудно-частотных характеристик LC-фильтра нижних частот 7-го порядка с потерями и LC-аналога пьезокерамического фильтра с потерями при гармоническом и экспогармоническом воздействиях, подтверждающее существование явления выделения активной мощности реактивными элементами при экспогармоническом воздействии. Показана возможность компенсации потерь в LC-фильтрах n -го порядка и возможность повышения рабочих частот LC-фильтров с помощью периодических экспогармонических сигналов. Данное явление может быть использовано для улучшения амплитудно-частотных характеристик катушечно-конденсаторных фильтров.

Литература

1. Ханзел Г.Е. Справочник по расчету фильтров. – М.: Советское радио, 1974. – 288 с.
2. Пат. 24456А Україна, МКИ Н03Н 7/03, Н03Н 11/06. Спосіб компенсації втрат резонансного контура: Пат. 24456А Україна, МКИ Н03Н 7/03, Н03Н 11/06 А.М. Іваницький (Україна); – № 94076326; Заявл. 21.07.94; Опубл. 21.07.98.
3. 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.
4. 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.
5. Іваницький А.М. Реактивные элементы при экспофункциональных воздействиях // Информатика и связь: Сб. науч. тр. Укр. госуд. связи им. А.С. Попова. – Одесса, 1996. – № 1. – С. 236 - 240.
6. 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.
7. 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.
8. Іваницький А.М., Паску Д.Г. Исправления к статье "Исследование цепей первого порядка при периодическом экспофункциональном воздействии" // Наукові праці ОНАС ім. О.С. Попова. – Одесса, 2005. – №1. – С. 98.
9. 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.
10. Іваницький А.М. Исследование потока магнитных монополей экспофункционального поля // Наукові праці ОНАС ім. О.С. Попова. – Одесса, 2003. – №2. – С. 9-14.
11. Зааль Р. Справочник по расчету фильтров: Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1983. – 752 с.
12. Проектирование фильтров по рабочим параметрам: Методическое руководство к курсовой работе по III части курса ТЛЭЦ / Сост. П.П. Воробийенко, А.В. Ладария – Одесса, 1984. – 28 с.