

Таким образом, был проведен анализ и подбор методики для проведения сопоставления работы разных схем преобразователей частоты. Подобраны параметры цепей смещения, которые позволяют получить на выходе заданные дифференциальный сигнал и коэффициент усиления. Получение спектральных характеристик и оценка линейности остаются задачей для будущих исследований.

Список используемых источников

1. Филин В. А., Смирнов В. С. Автоматизированная компьютерная программа быстрого расчета и оптимизации переходных и стационарных процессов в электрических цепях радиотехнических и телекоммуникационных устройств FASTMEAN. Свидетельство о регистрации № 2002610191 Российская Федерация; Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
2. Артым А. Д., Есполов К. Ж., Филин В. А. Матричные модели радиотехнических цепей / под ред. д.т.н., проф. В. А. Филина. СПб.: «Элмор», 2015. 280 с.
3. Джонс М. Х. Электроника – практический курс; пер. с англ. 2-е изд. М.: Техносфера, 2006. 512 с.
4. Фомин Н. Н., Буга Н. Н., Головин О. В. и др. Радиоприемные устройства: учебник для вузов / под редакцией Н. Н. Фомина. 3-е изд., стереот. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 520 с.
5. Бобрешов А. М., Малежин М. И., Степкин В. А., Усков Г. К. Двойной балансный смеситель для перемножения сверхширокополосных импульсных сигналов // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2014. N 2. С. 5–13.

ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ LC-ФИЛЬТРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ АППРОКСИМИРУЮЩИМИ ФУНКЦИЯМИ

В.В. Сергеев

Максимальная запасаемая энергия в реактивном фильтре является универсальным показателем его эффективности и определяет массу, габариты, потери энергии и параметрическую чувствительность характеристик фильтра. В работе приведены результаты сравнительного анализа указанных показателей и даны рекомендации по их оптимизации для фильтров Баттерворта, Чебышева (полиномиальных и инверсных) и Золотарева-Кауэра.

Ключевые слова: реактивный фильтр, энергетические функции, массогабаритные показатели.

PERFORMANCE INDICATORS LC-FILTERS WITH DIFFERENT FUNCTIONS APPROXIMATING

Sergeev V.

The maximum stored energy in the reactive filter is a universal indicator of its efficiency and determines the mass, dimensions, power loss and parametric sensitivity characteristics of the filter.

This paper presents the results of a comparative analysis of these indicators and recommendations for their optimization for Butterworth filters, Chebyshev and Zolotarev-Cauer.

Keywords: reactive filter, energy functions, mass and dimensions indicators.

При практической реализации реактивных фильтров для мощных радиотехнических устройств зачастую определяющее значение имеют такие его технико-экономические показатели как вес, габаритные размеры, стоимость, коэффициент полезного действия (КПД), а также стабильность частотных характеристик. Перечисленные показатели эффективности фильтров во многом определяются их энергетическими функциями, то есть функциями накапливаемой в реактивных элементах энергии [1]:

$$W_C = \sum_{i=1}^{N_C} U_i^2 C_i; \quad W_L = \sum_{i=1}^{N_L} I_i^2 L_i, \quad (1)$$

где W_C и W_L – суммы максимальных энергий, запасаемых во всех емкостях C_i (N_C – число конденсаторов) и во всех индуктивностях L_i (N_L – число катушек индуктивности), U_i и I_i – действующее значение напряжения и тока в соответствующем элементе.

Для радиотехнических и преобразовательных устройств используются реактивные фильтры с различными функциями, аппроксимирующими амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), из которых наиболее важными с практической точки зрения являются полиномы Баттерворта, Чебышева, обратные (инверсные) полиномы Чебышева, а также дроби Золотарева [2, 3].

Известно [1], что энергетические функции (1) связаны с фазовыми характеристиками четырехполюсника, а точнее с групповым временем задержки (ГВЗ). Для фильтров нижних частот (ФНЧ) характерна нарастающая функции ГВЗ с максимумом вблизи частоты среза фильтра и с последующим убыванием. При этом различным аппроксимирующим функциям соответствуют различные фазовые характеристики и, следовательно, различные энергетические функции в рабочей области, то есть в полосе пропускания фильтра.

В данной работе рассмотрены результаты сравнительного анализа реактивной энергии и связанных с ней показателей эффективности LC-фильтров нижних частот с указанными выше аппроксимирующими функциями и даны рекомендации по оптимизации этих показателей.

Будем считать, что заданы требования к характеристике затухания ФНЧ а именно, ω_o – граничная частота полосы пропускания, ω_k – граничная частота полосы задерживания, гарантированное затухание a_0 в полосе задерживания и допустимая неравномерность Δa характеристики затухания в полосе пропускания. В дальнейшем удобно использовать нормированную частоту $\Omega_k = \omega_k / \omega_o$.

Сравнительный анализ фильтров с различными аппроксимирующими функциями проводился при одинаковых требованиях к характеристике затухания для следующих важных для практического применения исходных услови-

ях: $a_0 = 20\text{--}80$ дБ; $\Omega_k = 1,3\text{--}2,0$; $\Delta a = 1\text{--}0,01$ дБ. В качестве критерия эффективности использовался энергетический показатель, а именно, максимальное в полосе пропускания значение относительной (нормированной) суммарной реактивной энергии:

$$\hat{W}_m = \max(W_C + W_L) \cdot \frac{\omega_0}{P_{2m}},$$

где P_{2m} – максимальное значение мощности, которую может передать в нагрузку генератор, подключенный к входу фильтра.

Расчеты проводились на ЭЦВМ по программам, описание которых приведено в [1]. В [1] предложен метод минимизации энергетических функций классических LC-фильтров, который основан на уменьшении неравномерности Δa характеристики затухания в полосе пропускания фильтра. С уменьшением неравномерности затухания Δa максимальное в рабочей области значение реактивной энергии уменьшается и принимает минимальное значение при некотором оптимальном значении неравномерности $\Delta a_{\text{опт}}$, которое для практически важных случаев составляет $(10^{-4}\text{--}10^{-6})$ дБ. Соответствующие фильтры названы оптимизированными по реактивной энергии. Следует заметить, что уменьшение Δa при неизменном гарантированном затухании a_0 достигается за счет увеличения порядка и числа элементов фильтра.

Можно предположить, что эффективность указанного метода минимизации энергетических функций будет зависеть от вида характеристик фильтра. Для иллюстрации этого на рисунке представлены зависимости максимальной в полосе пропускания суммарной реактивной энергии $\hat{W}_m$ от неравномерности затухания Δa для ФНЧ с различными аппроксимирующими функциями при конкретных требованиях в полосе задерживания: $\Omega_k = 1,5$; $a_0 = 60$ дБ.

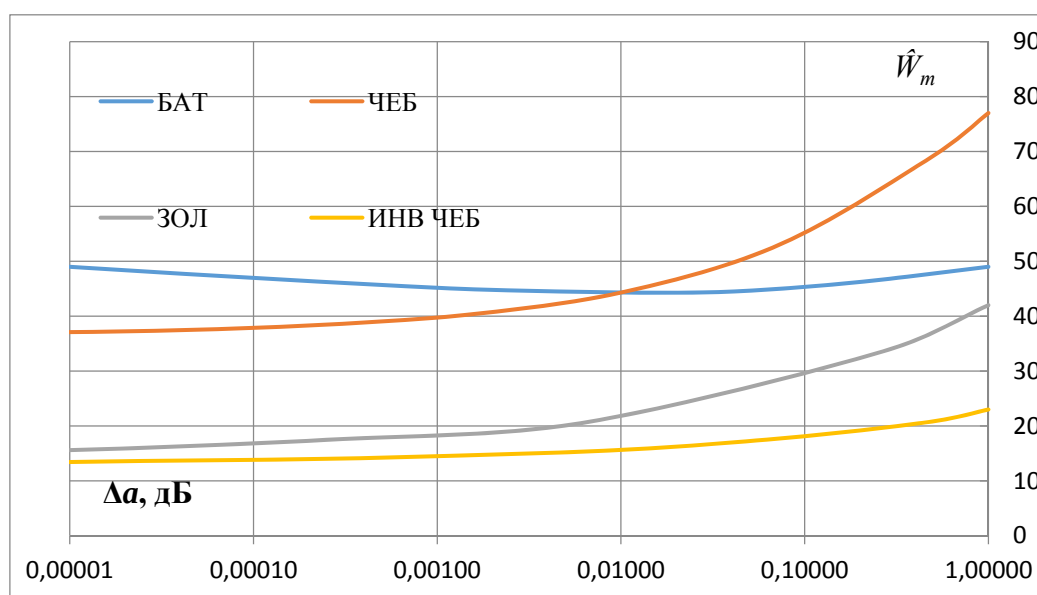


Рисунок. Зависимости максимальной реактивной энергии различных ФНЧ от неравномерности затухания Δa при $\Omega_k = 1,5$; $a_0 = 60$ дБ

На основании приведенных зависимостей можно сделать следующие выводы:

1. Для ФНЧ Баттерворта уменьшение неравномерности Δa не приводит к заметному уменьшению реактивной энергии. Для остальных фильтров за счет уменьшения Δa максимальная в рабочей области (в полосе пропускания) реактивная энергия $\dot{W}_m$ может быть уменьшена в 2–3 раза (при принятых, равных для всех фильтров требованиях к характеристике затухания в полосе задерживания).

2. Наименьшие энергетические показатели имеют инверсные ФНЧ Чебышева при прочих равных условиях, то есть при одинаковых значениях a_0 , Ω_k и Δa .

3. Оптимизированные по реактивной энергии фильтры с всплесками затухания (Золотарева-Кауэра и инверсные Чебышева) имеют по сравнению с полиномиальными фильтрами существенно меньшие энергетические показатели.

Эти выводы являются определенной закономерностью, так как остаются справедливыми и при других требованиях к характеристике затухания в полосе задерживания, то есть при других значениях a_0 и Ω_k .

Следует отметить, что для расчета LC-фильтров оптимизированных по реактивной энергии необходимо использовать известные аналитические или численные методы расчета, так как при малых неравномерностях затухания, какими являются $\Delta a_{\text{опт}}$, табулированных решений нет. Однако, в справочнике [3] представлены таблицы для расчета LC-фильтров с достаточно малым значением $\Delta a = 4,34 \cdot 10^{-4}$ дБ. Такие табличные варианты можно использовать для улучшения показателей эффективности фильтра по сравнению с традиционными решениями, которые предусматривают минимизацию числа его элементов.

Далее рассмотрим пример расчета LC-фильтра с учетом энергетических критериев и сравним его показатели эффективности с показателями традиционных вариантов. Примем следующие исходные данные: частота среза ФНЧ – $f_0 = 15$ кГц; неравномерность затухания в полосе пропускания не более $\Delta a = 0,5$ дБ; гарантированное затухание $a_0 = 60$ дБ в полосе задерживания при $f > f_k = 22,5$ кГц ($\Omega_k = 1,5$); сопротивление генератора и нагрузки $R_n = 270$ Ом; мощность в нагрузке $P_{2m} = 200$ кВт. При сравнительном анализе также принято, что коэффициенты потерь (обратные добротности) элементов $d_C = d_L = 0,005$; удельные энергоемкости: катушек индуктивностей 0,15 Дж/кг (по весу); 30 Дж/м³ (по объему); конденсаторов 0,3 Дж/кг; 700 Дж/м³.

В таблице приведены показатели традиционных и оптимизированных по реактивной энергии ФНЧ Чебышева (Ч), инверсных Чебышева (ИЧ) и Золотарева-Кауэра (ЗК). Обозначения в таблице: n – порядок фильтра; $\dot{W}_m$ – максимальные (в полосе пропускания) значения суммарной относительной реактивной энергии; C_Σ и L_Σ – суммарные емкости и индуктивности; $U_{C(L)}/U_n$ и $I_{C(L)}/I_n$ – максимальные значения относительных напряжений и токов в эле-

ментах (U_n и I_n – напряжение и ток в нагрузке); Δa_n – неравномерность затухания в полосе пропускания с учетом потерь в элементах.

ТАБЛИЦА. Параметры различных вариантов ФНЧ

Вид ФНЧ	n	Δa , дБ	$\dot{W}_m$	C_Σ нФ	L_Σ мГн	$U_{C(L)}/U_n$	$I_{C(L)}/I_n$	Δa_n , дБ	кпд %	вес кг	объём м ³	S_m
Ч	9	0,49	69,1	452	15,1	4,23	5,8	1,6	74	734	2,6	3,7
Ч опт	13	$2,3 \cdot 10^{-4}$	38,4	379	27,1	2,87	2,92	0,42	84	407	1,4	$3 \cdot 10^{-2}$
ИЧ	9	0,49	20,7	183	10,4	2,84	2,41	0,78	90	218	0,75	0,94
ИЧ опт	13	$2,3 \cdot 10^{-4}$	14,0	264	9,8	1,54	1,67	0,16	93,4	149	0,52	$1,3 \cdot 10^{-2}$
ЗК	6	0,25	33,3	220	8,8	3,88	2,73	0,77	86	354	1,2	1,3
ЗК опт	10	$3,9 \cdot 10^{-7}$	14,8	196	10,2	1,61	1,68	0,17	93,1	157	0,54	$5 \cdot 10^{-4}$

Во многих случаях в качестве обобщенного показателя чувствительности (стабильности) рассматривают максимальное в полосе пропускания значение среднеквадратической чувствительности (в таблице S_m). Указанные в таблице параметры рассчитывались путем моделирования на ЭЦВМ и по формулам, приведенным в [1].

На основании сравнительного анализа показателей, приведенных в таблице, можно отметить некоторые особенности важные при практической реализации фильтра.

При переходе от традиционных вариантов (с минимальным порядком) к оптимизированным по реактивной энергии ее уменьшение сопровождается уменьшением токов и напряжений, а также суммарных емкостей или индуктивностей. Однако суммарные параметры в некоторых случаях могут и увеличиваться. Например, для ФНЧ Чебышева несколько увеличивается суммарная индуктивность, а для инверсного фильтра Чебышева увеличивается суммарная емкость.

Потери в элементах фильтра влияют не только на его КПД, но и на такой его чувствительный параметр, как неравномерность Δa затухания в полосе пропускания. Увеличение этого параметра за счет потерь (Δa_n) для оптимизированных ФНЧ существенно. То же можно сказать и о среднеквадратической чувствительности S_m , которая у оптимизированных вариантов на несколько порядков меньше чем у традиционных.

Будем считать ФНЧ Чебышева порядка $n = 9$ первоначальным вариантом, который рассчитан на основании традиционного подхода без учета энергетического критерия, а вариант фильтра Золотарева-Кауэра $n = 10$ рекомендуемым вариантом. Последний по сравнению с первым имеет более чем в 4,6 раза меньше реактивную энергию, массу и габариты, а также характеризуется меньшим значением среднеквадратической чувствительности ($S_{CKm} = 0,0005$

против 3,7), меньшим влиянием потерь в элементах ($\Delta a_{\text{п}} = 0,17$ дБ против 1,6 дБ), большим КПД (91,3 % против 74 %) и имеют существенно меньшие суммарные параметры, токи и напряжения элементов при прочих равных условиях.

Таким образом, расчет LC-фильтров с учетом энергетических критериев позволяет существенно повысить его важнейшие показатели эффективности при практической реализации.

Список используемых источников

1. Дмитриков В.Ф., Сергеев В.В., Самылин И.Н. Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств. М.: Радио и связь, 2005. 424 с.
2. Справочник по расчету и проектированию ARC- схем / Под ред. Ланнэ А. А. М.: Связь, 1984. 368 с.
3. Зааль Р. Справочник по расчету фильтров; пер. с нем. / под редакцией Н. Н. Слепова. М.: Радио и связь, 1983. 752 с.