

УДК 621.391.061

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК ВЧ-ДИАПАЗОНА

И.С. Забродин, старший научный сотрудник ОАО «РИМР», к. ф.-м. н.; iszabrodin@gmail.com

В.Г. Раутиан, ведущий инженер ОАО «РИМР», vgrautian@mail.ru

Ключевые слова: синтез фильтров гармоник, передатчики ВЧ-диапазона.

Необходимость фильтрации гармоник на выходе мощных широкополосных передатчиков ВЧ-диапазона не теряет своей актуальности. Разработка новых передатчиков требует решения ряда проблем, связанных с суммированием модулей на мощных транзисторах, необходимостью сокращения тепловых потерь и т.д. С другой стороны, благодаря развитию компьютерной техники и специального математического программирования появилась возможность в значительной мере уйти от использования классических методов синтеза широкополосных цепей в применении к фильтрам гармоник и добиваться оптимизации рассчитываемых схем по гораздо большему числу рабочих параметров. Пример решения одной из таких задач – оптимизации с целью снижения суммарных тепловых потерь на всех элементах фильтра – рассмотрен в настоящей статье.

Современные подходы к синтезу фильтров гармоник. Серьезные требования к фильтрации гармоник в выходных цепях мощных широкополосных передатчиков продиктованы жесткими нормами по электромагнитной совместимости, расширением абсолютного и относительного диапазонов частот, в пределах которых осуществляется передача информации, использованием сканирования в широкой полосе частот и т.д. Технические требования к системе фильтрации предъявляются сразу по большому числу параметров: перекрытию по частоте $\alpha = f_{\text{верх}} / f_{\text{нижн}}$; гарантированному затуханию в полосе задерживания a_r (дБ); допустимой неравномерности затухания на рабочих частотах Δa ; коэффициенту трансформации; практической реализуемости элементов, их добротности и др.

Научные разработки систем фильтрации часто приводят к интересным и полезным результатам, тогда как конструкторские решения заметно консервативнее. Регулировщикам фильтров гармоник (ФГ) удается соблюсти нормы лишь по уровню 2–4-й гармоник, хотя в регламентирующих документах

говорится о 7-й и 8-й гармониках, падающих даже в ОВЧ-диапазон.

В последней трети 20-го века в расчетах ФГ для ВЧ-диапазона главенствовали два подхода. *Первый* заключался в выборе стандартной аналитической функции и поиске значений ее варьируемых параметров, которые удовлетворяли бы и условиям физической реализуемости, и техническим требованиям. В большинстве случаев использовались три классические аппроксимации амплитудно-частотных характеристик (АЧХ):

1) аппроксимация по Баттерворту (по Тейлору либо максимально плоская): $|T(j\Omega)|^2 = 1/(1+\Omega^{2n})$. Функция $|T(j\Omega)| = 1$ в точке $\Omega=0$, а ее $2n-1$ первые производные обращаются в этой точке в нуль. Этой функции соответствуют цепи низкочастотной (НЧ) структуры с меньшим по сравнению с другими аппроксимациями подавлением гармоник (затуханием) и худшей селективностью;

2) аппроксимация по Чебышеву, или равноволновая: $|T(j\Omega)|^2 = 1/(1+\varepsilon^2 P_n^2(\Omega))$. Здесь роль функции фильтрации (ФФ) играют самые эффективные для этой цели полиномы – полиномы Чебышева $P_n(\Omega)$, равнопulsирующие с размахом от 0 до 1 в полосе частот $0 \leq \Omega \leq 1$. Как результат пульсации, АЧХ в полосе пропускания имеют размах по амплитуде от 1 до $1/(1+\varepsilon^2)$, где ε является мерой неравномерности. Одно из определений полиномов Чебышева первого рода: $P_n(\Omega) = \cos(n \cdot \arccos \Omega)$. Например, $P_0(\Omega) = \cos 0 = 1$, $P_1(\Omega) = \cos(\arccos \Omega) = \Omega$, $P_2(\Omega) = \cos(2 \cdot \arccos \Omega) = 2\Omega^2 - 1$ и т.д. Уровень подавления с помощью НЧ-фильтров Чебышева определяется в основном параметром n . В качестве развития равноволновой аппроксимации существуют разнообразные аппроксимации не на полиномах Чебышева, но в «чебышевском» смысле.

3) фильтрация заметно усиливается с введением в полосу задерживания $1 \dots n$ полюсов. Традиционное решение – фильтры Кауэра, строящиеся по ФФ с всплесками затухания (на основе дробей Золотарева); у этих ФФ число по-

люсов равно, по определению, числу нулей: $m=n$.

Второй подход заключается в следующем. Если по условиям задачи необходимо эффективнее использовать элементы ФГ для повышения его селективности, увеличить коэффициент использования соотношения Боде, снизить чувствительность АЧХ к отклонениям значений элементов от расчетных, обеспечить заданную трансформацию сопротивлений или удовлетворить другим требованиям конкретной задачи, разумно отказаться от классических аппроксимаций и искать решение на основе ФФ общего вида:

$$F(p) = Ap^{\pm \nu} \prod_1^n (p^2 + \Omega_{0i}^2) / \prod_1^m (p^2 + \Omega_{\infty k}^2), \quad (1)$$

где A – вещественное положительное число (нормирующий множитель); ν – натуральное число или нуль; Ω_{0i} и $\Omega_{\infty k}$ – частоты соответственно нулевого и бесконечного затухания (нули и полюсы), не связанные между собой математически; $p = j\Omega$. Существуют и другие функции, близкие по виду к (1). В частности, нули допускаются не только на мнимой оси, но и на комплексной плоскости ($p = \sigma + j\Omega$), что открывает возможность варьирования параметров с целью оптимизации других характеристик цепи за счет некоторого снижения селективности.

Важна еще одна сторона задачи синтеза. На практике применялись три его версии: классические (а) по *передаточной* функции $|Z_{21}(j\Omega)|$ (или $|S_{21}|$) и (б) по функции коэффициента использования мощности, связанной с коэффициентом отражения G на входе цепи (или S_{11}); (в) так называемая интерполяционная версия. Две первые функции строятся с участием полиномов Гурвица (все нули полиномов расположены в левой p -полуплоскости), что теоретически обеспечивает реализуемость цепи.

Интерполяция координат пар соответствующих нулей этих двух версий также приводит к реализуемой цепи. На этом и построена интерполяционная версия, однако ее расчетный аппарат не контролирует выполнение

других заданных требований. Поэтому далее полученный набор параметров оптимизировали, перемещая интерполированные нули «вручную», и каждый раз операция завершалась анализом этого набора. Если же этой методикой не пользовались, компромисс между передаточной и входной АЧХ приходилось находить фактически уже при настройке аппаратуры. Данная методика выглядит несколько громоздкой, но благодаря развитию вычислительной техники сегодня она заметно превосходит по эффективности классические.

С созданием мощной доступной вычислительной техники и развитием численных методов решения экстремальных задач при разработке ФГ и согласующих цепей появилась возможность учитывать в расчетах конструктивные особенности реализации ФГ, а также большое разнообразие целевых функций и ограничений.

Подобные задачи обычно решаются в два этапа. На первом выбирается структура ФГ и с помощью классического расчетного аппарата вычисляется начальное приближение параметров по упрощенной модели. Кроме того, приближенно определяется конструкция ФГ. На втором этапе вводятся требуемые дополнительные ограничения и модель дополняется соотношениями, описывающими конструктивные особенности (добротность и взаимная индуктивность катушек, емкость и индуктивность соединительных шин и т.д.). Затем с помощью численных методов решается новая экстремальная задача.

В последнее время подобная методика применялась для решения таких задач, как:

- расчет пары (вилки) ФНЧ+ФВЧ с дополнительным ограничением на коэффициент отражения $|S_{11}|$ в переходной полосе;
- расчет ФГ с учетом добротности катушек;
- учет взаимной индуктивности катушек;
- оценка и минимизация расхождения фазы передаточной характеристики S_{21} при различных вариантах настройки ФГ. Задача актуальна при суммировании мощности отдельных передатчиков.

Настройка ФГ высокого порядка – довольно трудоемкая процедура, но ее значительно облегчает использование доступных измерительных приборов, позволяющих производить непосредственный обмен данными с программой расчета. Разработанная методика настройки предполагает измерение ре-

ального импеданса начиная с первого элемента ФНЧ со стороны нагрузки, корректировку в соответствии с этим расчетов последующих элементов и добавление их одного за другим. Такая *пошаговая* технология объединяет настройку, уточнение расчета под «железо» и коррекцию элементов, вплоть до нового их изготовления. Использование этой методики существенно сокращает время настройки и количество подстроечных элементов.

Проиллюстрируем новые возможности на примере расчета ФГ с учетом добротности индуктивностей. Данная задача крайне актуальна, поскольку добротности реактивных элементов определяют их нагрев, габариты, величину паразитной реактивности противоположного знака и т.д.

Синтез ФГ с учетом добротности индуктивностей. В этой серии численных экспериментов представим комплексное сопротивление индуктивности в виде

$$Z_l = (j + 1/Q)\Omega l, \quad (2)$$

где Ω – нормированная частота; l – индуктивность; Q – параметр, имеющий одно и то же значение для всех индуктивностей; $j^2 = -1$.

Выбор критерия оптимизации. Из $|S_{11}|=0$ не следует, что $|S_{21}|=1$, и тогда классический синтез ФГ по модулю коэффициента отражения или по $Z_{вх}$ невозможен. Лестничная структура ФНЧ, содержащая индуктивности с ненулевой добротностью, не имеет нулей коэффициента передачи S_{21} при вещественных Ω (кроме, возможно, $\Omega=\infty$). Неизвестен и вид оптимальной зависимости коэффициента передачи S_{21} от Ω .

В наших численных экспериментах проводится синтез ФГ при сочетании следующих критериев:

1. $Lp^2 = 1/|S_{21}|^2 = 0,25|a_{11} + a_{12} + a_{21} + a_{22}|^2$.
2. $I_{in} = |a_{21} + a_{22}|$.
3. $U_{in} = |a_{11} + a_{12}|$.
4. $P_{in} = U_{in} I_{in} \cos \varphi$.

Здесь a_{ij} – элемент матрицы передачи четырехполосника. Полагаем сопротивление нагрузки $R_n=1$, а в критерий 1 сопротивление генератора $R_g=1$.

Критерий 1 представляет собой рабочее затухание в согласованной схеме. Синтез ФГ по этому критерию должен приводить к тем же результатам, что и синтез по коэффициенту отражения при $Q=\infty$. Критерием 2 является входной ток при ВЧ-мощности в нагрузке $P_n=1$, а критерием 3 – входное напряжение при $P_n=1$; при $Q=\infty$ этот критерий приводит к результатам, схожим с результатами критерия, использующе-

го $|Z_{вх}|$. В качестве критерия 4 выступает входная мощность при $P_n=1$. В данном случае $P_{in}-P_n$ – это активные потери в ФГ. Если рассматривается чисто НЧ-структура, то $P_{in}-P_n$ – мощность, рассеиваемая только на индуктивностях; при $Q=\infty$ она тождественно равна 0.

Использование критерия 1. Задача оптимизации (фильтрация лишь до гармоники 3а) здесь имеет классический вид (с ограничением P):

$$\begin{aligned} \max_{1 \leq \Omega \leq \alpha} Lp^2(c, l, \Omega, Q) \rightarrow \min_{l, c} \\ \min_{2 \leq \Omega \leq 3\alpha} Lp^2(c, l, \Omega, Q) \geq P. \end{aligned} \quad (3)$$

При $Q=\infty$ решение этой задачи известно. Нули функции S_{11} должны находиться в полосе пропускания $[1, \alpha]$, нули S_{21} – в полосе задерживания $[2, 3\alpha]$. Поскольку оптимальная зависимость S_{21} от Ω при $Q \neq \infty$ неизвестна, находим оптимальное решение при $Q=\infty$, а затем решаем задачу (3), где на каждом шаге значение Q снижается. Вычисления проводятся методом линеаризации, позволяющим находить лишь локальные минимумы. Поэтому после нахождения очередного минимума при заданном Q и использовании (l, c) , полученных при предыдущем значении Q , ищем другой локальный минимум, применяя новое начальное приближение (l, c) . Во всех случаях были найдены очень близкие по значению оптимальные точки, хотя в начальном приближении не допускались перестановка нулей S_{21} и вырождение структуры ($0 < c_i, l_i < \infty$). В качестве примера приводится решение задачи (3) для фильтра 7-го порядка (рис. 1).

В табл. 1 приведены варианты расчета для различных Q при $\alpha=1,5$ и $10 \lg P=60$ и использованы следующие обозначения: Q – параметр при решении задачи (3); lp (дБ) – значение минимума в задаче (3); p – значение критерия 4; $lp0$ (дБ) – значение максимума Lp^2 при оптимальных значениях параметров (l, c) , когда $Q=\infty$ после подстановки текущего значения Q . Разница между lp и $lp0$ в каждом столбце табл. 1 показывает, как сократились общие потери с учетом добротности; $p0$ – значение критерия 4 при оптимальных зна-

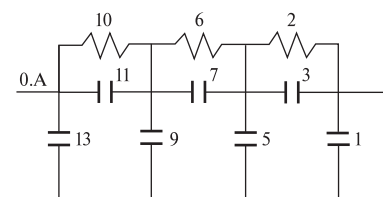


Рис. 1

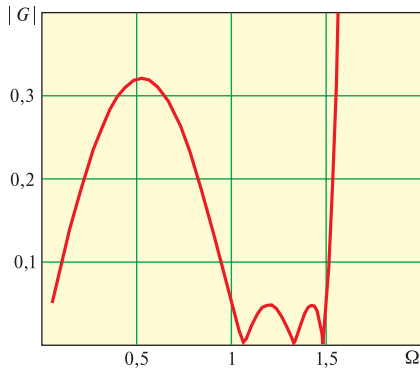


Рис. 2

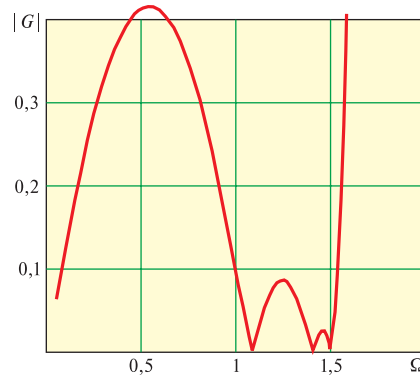


Рис. 3

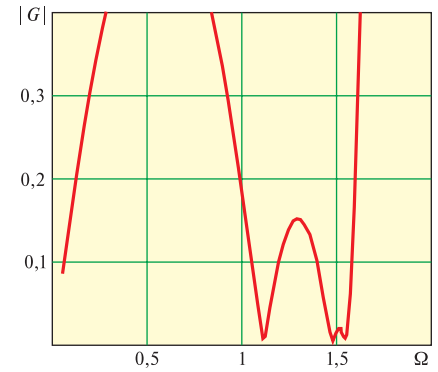


Рис. 4

чений (l, c) для $Q = \infty$ (столбец 2) после подстановки текущего значения Q .

Отличие p от p_0 показывает, как сократились активные потери внутри фильтра при расчете с учетом добротности. Оно напрямую не учитывается в (3); $P_{\max L_2}, P_{\max L_6}, P_{\max L_{10}} - \max_{1 \leq i \leq \alpha} |U_i| |I_i|$ для $i=2, 6, 10$.

Отличие lp от lp_0 показывает, что даже при $Q=250$ общие потери из-за роста коэффициента отражения сократились незначительно. Однако активные потери Q , как показывает p/p_0 , сократились в 1,22 раза (6,48:5,32). Основное сокращение произошло за счет снижения потерь на индуктивности l_6 : $P_{\max L_6} = 8,0$ при $Q = \infty$ и $P_{\max L_6} = 5,1$ при $Q = 250$.

На рис. 2–4 приведены графики зависимости $|S_{11}| = |G|$ от Ω при $Q = \infty, 1000$ и 250 соответственно. Маркерами отмечены границы полосы пропускания. Интересно, что с уменьшением Q минимумы $|G|$ смещаются в сторону больших Ω , а один из минимумов даже

выходит из полосы пропускания при снижении Q до 250 (см. рис. 4), чего не бывает в классическом синтезе ФГ.

При сужении полосы пропускания или усложнении схемы этот эффект наблюдается при больших значениях Q : $\alpha=1,3, Q=2000$ (рис. 5).

Оптимизация фильтров, подключенных к источнику тока. Предположим, что внутреннее сопротивление ВЧ-генератора очень велико, поэтому система (3) не может служить критерием качества ФГ. Кроме того, в этом случае должно присутствовать ограничение на входное напряжение ФГ (в классическом случае – ограничение на $|Z_{вх}|$). Рассмотрим две задачи.

Первая:

$$\begin{aligned} \max_{1 \leq \Omega \leq \alpha} I_{in}(c, l, \Omega, Q) &\rightarrow \min_{l, c}; \\ \max_{1 \leq \Omega \leq \alpha} U_{in}(c, l, \Omega, Q) &\leq U; \\ \min_{2 \leq \Omega \leq 3\alpha} I_{in}(c, l, \Omega, Q) &\geq P, \end{aligned} \quad (4)$$

где I_{in} – входной ток ФГ при условии, что мощность на нагрузке $P_n = 1$; U_{in}

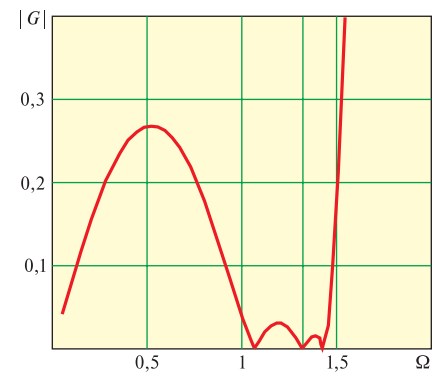


Рис. 5

– входное напряжение при $P_n = 1$; U – ограничение на входное напряжение. Последнее неравенство в (4) корректно только при условии, что задача нормирована так, что I_{in} в полосе пропускания мало отличается от 1. Такая задача всегда имеет решение и корректна при любых значениях Q , включая ∞ . Ее решение – первое выражение в (4) – дает максимальный ток, необходимый для получения единичной мощности на нагрузке.

Если ток увеличится и проектируемая система генератор+ФГ окажется критична к активным потерям в ФГ (перегрев катушек), целесообразно оптимизировать решение системой, у которой целевая функция – мощность, рассеиваемая на элементах фильтра. Таким образом, вторая задача может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \max_{1 \leq \Omega \leq \alpha} P_{in}(c, l, \Omega, Q) &\rightarrow \min_{l, c}; \\ \max_{1 \leq \Omega \leq \alpha} I_{in}(c, l, \Omega, Q) &\leq I; \\ \max_{1 \leq \Omega \leq \alpha} U_{in}(c, l, \Omega, Q) &\leq U; \\ \min_{2 \leq \Omega \leq 3\alpha} I_{in}(c, l, \Omega, Q) &\geq P. \end{aligned} \quad (5)$$

Задача (5) имеет смысл при $Q \neq \infty$. В качестве начального приближения можно использовать решение (4), при этом ограничение I должно превышать минимум, достигнутый в (4). К недо-

Таблица 1

| Q | ∞ | 5000 | 2000 | 1000 | 500 | 250 |
|-------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| lp | 0,01 | 0,018 | 0,032 | 0,062 | 0,1119 | 0,226 |
| p | 1,0 | 1,0031 | 1,0074 | 1,0143 | 1,0276 | 1,0532 |
| lp_0 | 0,01 | 0,024 | 0,044 | 0,078 | 0,147 | 0,283 |
| p_0 | 1,0 | 1,0032 | 1,0079 | 1,0159 | 1,0320 | 1,0648 |
| $P_{\max L_2}$ | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 3,9 | 3,9 |
| $P_{\max L_6}$ | 8,0 | 7,7 | 7,2 | 6,6 | 5,9 | 5,1 |
| $P_{\max L_{10}}$ | 3,7 | 3,6 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,6 |
| c_1 | 0,5653 | 0,579 | 0,601 | 0,635 | 0,676 | 0,734 |
| l_2 | 0,5435 | 0,531 | 0,512 | 0,483 | 0,45 | 0,411 |
| c_3 | 0,337 | 0,345 | 0,360 | 0,383 | 0,414 | 0,456 |
| c_5 | 1,15 | 1,17 | 1,204 | 1,260 | 1,332 | 1,416 |
| l_6 | 0,493 | 0,477 | 0,452 | 0,417 | 0,379 | 0,334 |
| c_7 | 0,492 | 0,509 | 0,538 | 0,582 | 0,642 | 0,729 |
| c_9 | 1,289 | 1,316 | 1,36 | 1,432 | 1,524 | 1,638 |
| l_{10} | 0,69 | 0,675 | 0,651 | 0,616 | 0,574 | 0,528 |
| c_{11} | 0,116 | 0,119 | 0,124 | 0,132 | 0,143 | 0,158 |
| c_{13} | 0,732 | 0,75 | 0,78 | 0,825 | 0,881 | 0,957 |

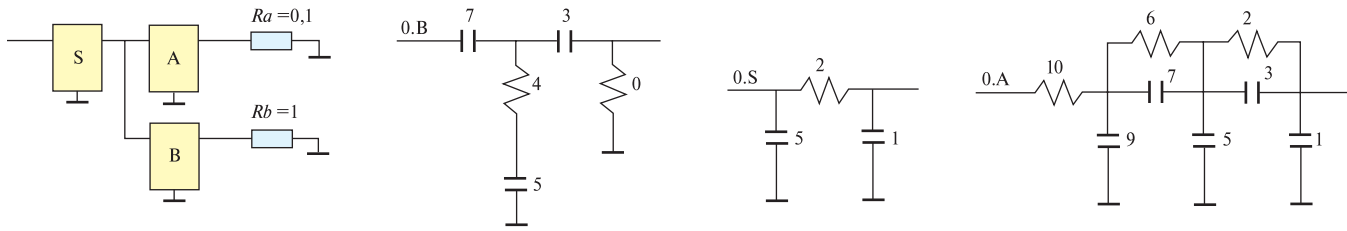


Рис. 6

Таблица 2

| Z | 1 | | 2 | | 3 | |
|-----------------|-----------------|----------------|----------|---------|-----------------|----------------|
| | min | max | min | max | min | max |
| reZ | 0,9283 | 1,0594 | 0,9276 | 1,0570 | 0,9064 | 1,0374 |
| imZ | -0,4312 | 0,4952 | -0,4301 | 0,4901 | -0,4018 | 0,4837 |
| magZ | 0,9285 | 1,1382 | 0,9276 | 1,1410 | 0,9064 | 1,1035 |
| argZ | <u>-24,8198</u> | <u>27,7523</u> | -24,7760 | 27,6294 | <u>-23,5300</u> | <u>27,7637</u> |
| G | 0,0261 | 0,2489 | 0,0288 | 0,2474 | 0,0322 | 0,2479 |
| U _{in} | 0,9638 | <u>1,1059</u> | 0,9733 | 1,1333 | 0,9620 | <u>1,1062</u> |
| I _{in} | 0,9716 | <u>1,0381</u> | 0,9897 | 1,0551 | 0,9978 | <u>1,0614</u> |
| P _{in} | 1,0001 | 1,0005 | 1,0189 | 1,0429 | 1,0189 | 1,0425 |
| Lp | 0,0052 | 0,2789 | 0,0895 | 0,3711 | 0,0915 | 0,3566 |

статкам (4) и (5) относится отсутствие прямого контроля фазы входного сопротивления, поэтому при необходимости обе системы можно дополнить ограничением

$$\max_{1 \leq \Omega \leq \alpha} |\arg Z_{\text{вх}}(c, l, \Omega, Q)| \leq \theta. \quad (6)$$

Приведем примеры решения (4) и (5) для вилки фильтров ФНЧ(А)+ФВЧ(В) с фиксированной с5 – емкостью генератора в структуре S (рис. 6). Так как в (4)–(6) не учитываются характеристики ФВЧ, его элементы при оптимизации также фиксируются. Рассчитыва-

Таблица 3

| | 1 | | 2 | |
|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | min | max | min | max |
| reZ | 0,8320 | 0,9611 | 0,7610 | 0,9400 |
| imZ | -0,4456 | 0,4376 | -0,4086 | 0,3998 |
| magZ | 0,8410 | 0,9820 | 0,7925 | 0,9466 |
| argZ | <u>-27,7433</u> | <u>27,7433</u> | <u>-27,7178</u> | <u>27,7178</u> |
| G | 0,0375 | 0,2489 | 0,0361 | 0,2580 |
| U _{in} | 0,9298 | <u>1,0578</u> | 0,9147 | <u>1,0115</u> |
| I _{in} | 1,0289 | <u>1,1057</u> | 1,0399 | <u>1,1553</u> |
| P _{in} | 1,0171 | <u>1,0346</u> | 1,0158 | <u>1,0310</u> |
| Lp | 0,0832 | 0,4233 | 0,0778 | 0,4246 |

Таблица 4

| | | | | | |
|------|-------------------|-------|--------------------|------|-------------------|
| s.c1 | 4,27869117615417 | a.c5 | 1,60531588063465 | b.l0 | 0,43395866521587 |
| s.l2 | 0,383717551721398 | a.l6 | 0,0617868787127114 | b.c3 | 0,950017618445554 |
| s.c5 | 1,79447772373049 | a.c7 | 3,98763263661256 | b.l4 | 0,527787565803085 |
| a.c1 | 0,968047642300048 | a.c9 | 3,01273947160223 | b.c5 | 0,435424741787547 |
| a.l2 | 0,164106690006027 | a.l10 | 0,22789132391484 | b.c7 | 0,43395866521587 |
| a.c3 | 1,25798074922636 | | | | |

ем цепи с трансформацией: R_н=0,5 для ФНЧ и R_н=1 – для ФВЧ.

Как и в предыдущей задаче, сначала решалась последовательность задач (4) со снижением Q от ∞ до заданного значения. Затем, используя решение (4) при заданном Q в качестве начального приближения, решалась задача (5). Поскольку задача (4) имеет и самостоятельное значение, рассмотрим примеры ее решения.

В табл. 2 приведены характеристики ФГ, полученные при решении задач (4) и (6). При этом α=1,5; U=1,1; θ=27,5; 10lgP=60, G – модуль коэффициента отражения. В столбце 1 приведены минимумы и максимумы характеристик в полосе пропускания при оптимизации для Q=∞. Подчеркнутые значения – критерии и целевые функции для (4) и (6). Все остальные значения справочные. Заметим, что P_{in}>1 из-за потерь в нагрузке ФВЧ.

В столбце 2 представлены характеристики этого же ФГ после подстановки Q=350. Кроме превышения ограничения по U_{вх} (1,133 вместо 1,106), существенных изменений характеристик не произошло. В столбце 3 приведены характеристики ФГ, оптимизирован-

ного для Q=350. В качестве начального приближения использовались параметры из столбцов 1 и 2. Целевая функция I_{вх} выросла с 1,055 до 1,061, а значение ограничения на U_{вх} практически было восстановлено (с 1,133 до 1,106). В итоге на решение в целом учет параметра Q серьезно не повлиял.

Рассмотрим решение задачи (5) с ограничением (6). Как уже отмечалось, задача (5) не имеет смысла при Q=∞, поэтому полученный результат необходимо сравнивать со столбцом 3 табл. 2, так как в столбце 1 Q=∞, а в столбце 2 не выполнено ограничение по U_{вх}. Поскольку максимальное значение I_{вх} в задаче (4) составило 1,0614, то ограничение I по току в задаче (5) должно превышать это значение.

В табл. 3 представлены результаты решения задач (5)+(6). В столбцах 1 и 2 приведены характеристики ФГ при ограничении I=1,1 и I=1,15 соответственно. В первом случае при увеличении максимального тока с 1,0614 до 1,1057 активные потери в фильтре и на нагрузке ФВЧ сократились в 1,23 раза (4,25:3,46). При увеличении тока до 1,1553 – в 1,37 раза. Заметим также, что в последних двух случаях ограничение на U_{вх} не достигается. Параметры ФГ, характеристики которых приведены в столбце 2 табл. 3, представлены в табл. 4.

Таким образом, успех проектирования ФГ в наше время в наибольшей мере зависит от уровня квалификации математика-программиста и его обеспеченности компьютерной техникой. В настоящей работе в качестве иллюстрации возможностей современного синтеза широкополосных цепей приводится серия численных экспериментов для решения задачи оптимизации ФГ по одному из многочисленных рабочих параметров – суммарным активным потерям в реактивных элементах. Ее решение привело к снижению потерь в элементах до 20%, а расчетные значения реактивных элементов в 1,2–1,5 раза отличаются от значений, полученных при расчетах без учета добротности элементов.

Получено 19.09.11