

Самкова Татьяна Олеговна

студентка

Орлов Алексей Вениаминович

канд. техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВПО

«Уфимский государственный авиационный
технический университет» в г. Стерлитамаке

г. Стерлитамак, Республика Башкортостан

ИССЛЕДОВАНИЕ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Аннотация: в статье рассматривается вопрос исследования сглаживающих фильтров с целью определения коэффициента сглаживания, подходящего для любого сглаживающего фильтра, а также получения формул комплексных коэффициентов сглаживания простых и составных пассивных фильтров. Авторы ставят своей целью показать условия применения расчетных формул и фильтров.

Ключевые слова: фильтр, сглаживающий фильтр, выпрямитель, выпрямленное напряжение, пассивный фильтр.

Сглаживающие фильтры предназначены для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения u_d , которое, в свою очередь, в общем виде записывается как сумма гармоник разложения в ряд Фурье:

$$u_d = U_d + \sum_q U_{dm(q)} \sin(qm\omega t + \psi_q),$$

где U_d – среднее значение выпрямленного напряжения; $U_{dm(q)}$ – амплитуда q -й гармоники; $q = 1, 2, 3, \dots$ – порядковые номера гармоник; m – эквивалентное число фаз (число пульсаций за период); ω – угловая частота питающей сети; ψ_q – начальная фаза q -й гармоники.

Для сглаживания используют пассивные фильтры низких частот (рис.1, 2), которые пропускают постоянную составляющую U_d и уменьшают переменную $U_{dm(q)}$. Способность фильтра сглаживать оценивают по величине коэффициента сглаживания [1]:

$$K_{сг(q)} = \frac{K_{пd(q)}}{K_{пн(q)}},$$

где $K_{сг(q)}$ – коэффициент сглаживания фильтра по гармонике пульсаций q ; $K_{пd(q)}$ – коэффициент пульсаций на входе фильтра; $K_{пн(q)}$ – коэффициент пульсаций на выходе (на нагрузке).

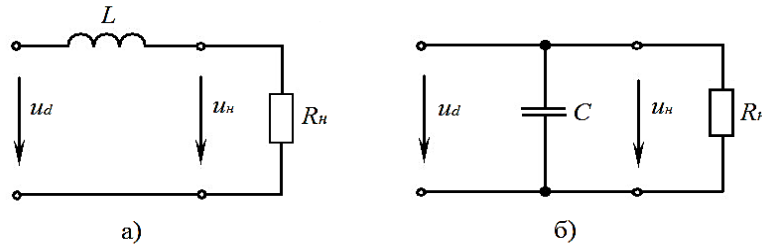


Рис. 1. Простые пассивные сглаживающие фильтры:

а – L-фильтр; б – C-фильтр

Но данное определение коэффициента сглаживания не подходит для простого пассивного емкостного фильтра (рис.1, б), т. к. $u_n = u_d$. Поэтому $K_{пd(q)}$ определяют как коэффициент пульсаций до установки фильтра, а $K_{пн(q)}$ – как коэффициент пульсаций на выходе (нагрузке) после установки фильтра.

Обычно коэффициенты пульсаций выпрямленного напряжения определяют по первой гармонике (т.е. $q=1$), т.к. относительное значение амплитуд высших гармоник изменяется (уменьшается) с увеличением номера гармоники.

$$K_d(q) = \frac{U_{dm(q)}}{U_d} = \frac{2}{q^2 m^2 - 1}$$

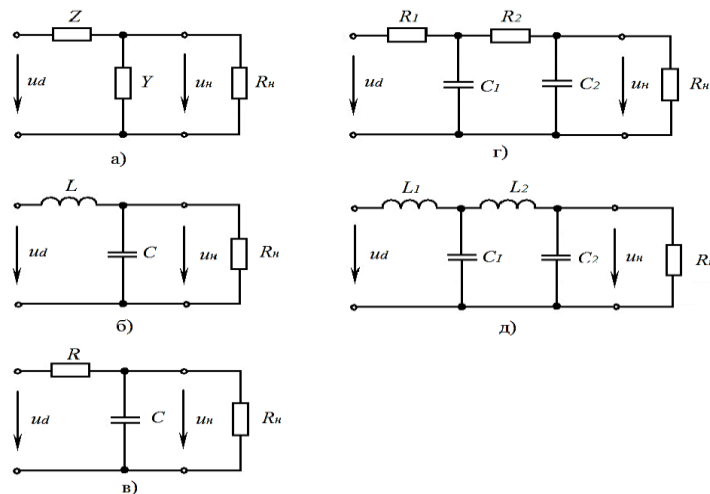


Рис. 2. Составные пассивные сглаживающие фильтры:

Г-образные фильтры – а, б, в; двухзвенные Т-образные фильтры – г, д.

Коэффициент сглаживания для основной гармоники:

$$K_{\text{сг}} = \frac{U_{dm(1)}U_{\text{н}}}{U_d U_{\text{нм}(1)}} = \lambda K_{\text{ф}}$$

где $U_{dm(1)}$, U_d – постоянная составляющая и значение амплитуды основной гармоники выпрямленного напряжения до установки фильтра; $U_{\text{нм}(1)}$, $U_{\text{н}}$ – постоянная составляющая и значение амплитуды основной гармоники выпрямленного напряжения на нагрузке после установки фильтра; $\lambda = \frac{U_{\text{н}}}{U_d}$ – коэффициент передачи постоянной составляющей напряжения с входа фильтра на его выход; $K_{\text{ф}} \frac{U_{dm(1)}}{U_{\text{нм}(1)}}$ – коэффициент фильтрации, который устанавливает во сколько раз уменьшается амплитуда пульсаций основной гармоники на выходе фильтра, по сравнению с его амплитудой на входе.

Величина коэффициента передачи для фильтров большой мощности $\lambda \approx 0,99$, малой мощности $\lambda \approx 0,91$ – $0,95$, для фильтров без потерь $\lambda = 1$. Для индуктивного фильтра (рисунок 1, а) комплексный коэффициент фильтрации:

$$K_{\text{фL}} = \frac{U_{dm(1)}}{U_{\text{нм}(1)}} = \frac{R_{\text{н}} + j\omega_{\text{п}}L}{R_{\text{н}}} = 1 + \frac{j\omega_{\text{п}}L}{R_{\text{н}}} \quad (1)$$

где $\omega_{\text{п}} = m\omega$ – частота пульсаций основной гармоники выпрямленного напряжения; L – индуктивность дросселя фильтра; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки.

На угол сдвига фаз переменной составляющей напряжения на входе и выходе фильтра влияет только аргумент комплексного коэффициента фильтрации, который зависит от реактивного характера пассивного сглаживающего фильтра.

Модуль коэффициента сглаживания идеального L -фильтра:

$$|K_{\text{сгL}}| = |K_{\text{фL}}| = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{\text{п}}L}{R_{\text{н}}}\right)^2} \approx \frac{\omega_{\text{п}}L}{R_{\text{н}}}$$

Как следует из (1), индуктивный фильтр эффективен при малых сопротивлениях нагрузки, т. е. для выпрямителей большой мощности.

Точный расчет емкостного фильтра (рис. 1, б) возможен только с учетом реального процесса заряда конденсатора через сопротивление трансформатора и вентилей и его разряда на нагрузку.

Оценить коэффициент фильтрации емкостного фильтра можно аналогично (1):

$$K_{\phi C} = \frac{R \| 1/j\omega_{\pi} C}{Re(R \| 1/j\omega_{\pi} C)} = 1 - j\omega_{\pi} C R_{\pi} \quad (2)$$

где C – емкость конденсатора фильтра;

$$|K_{\text{сгс}}| = |K_{\phi C}| = \sqrt{1 + (\omega_{\pi} C R_{\pi})^2} \approx \omega_{\pi} C R_{\pi}$$

Из (2) следует, что емкостный фильтр имеет большой коэффициент сглаживания в случае высокоомной нагрузки, т. е. применяется для маломощных выпрямителей.

Для составных Г-образных фильтров (рисунок 2, а) коэффициент фильтрации определяют по формуле:

$$K_{\phi} = \frac{U_{\text{дм}(1)}}{U_{\text{нм}(1)}} = \frac{Z + 1/(Y + 1/R_{\pi})}{Re[Z + 1/(Y + 1/R_{\pi})]} = 1 + Z(Y + 1/R_{\pi}) \quad (3)$$

Для LC-фильтра (рисунок 2, б) $Z = j\omega_{\pi} L$; $Y = j\omega_{\pi} C$, поэтому:

$$K_{\phi LC} = 1 - \omega_{\pi}^2 LC + j\omega_{\pi} L/R_{\pi} \quad (4)$$

по модулю:

$$|K_{\phi LC}| = \sqrt{(1 - \omega_{\pi}^2 LC)^2 + (\omega_{\pi} L/R_{\pi})^2} \quad (5)$$

С учетом условий:

$$\omega_{\pi} C \gg 1/R_{\pi} \text{ (на практике } \omega_{\pi} C \geq 5/R_{\pi}); \quad (6)$$

$$\omega_{\pi} L \gg R_{\pi} \text{ (на практике } \omega_{\pi} L \geq 5R_{\pi}); \quad (7)$$

получится [1]:

$$|K_{\phi LC}| = \omega_{\pi}^2 LC - 1 \quad (8)$$

Т. о, при выполнении условий (6) и (7) коэффициент фильтрации составного фильтра определяют как произведение коэффициентов фильтрации простых фильтров

$$|K_{\text{сгсLC}}| = |K_{\phi LC}| \approx |K_{\phi L}| |K_{\phi C}| \quad (9)$$

Выражение (9), в свою очередь, приводит многих авторов к такой ошибке, как: емкостный фильтр ставят перед индуктивным. Но этом случае коэффициент сглаживания получится значительно меньше, зато повышается Ud из-за того, что

фильтр имеет емкостный вход. Правильное расположение элементов Г-образного LC -фильтра показано на рисунке 2, б. Конденсатор, шунтирует нагрузку, после – уменьшает ее сопротивление, а увеличение тока через дроссель делает его работу эффективнее.

На рисунке 3 представлена зависимость коэффициента фильтрации (сглаживания) для идеального LC -фильтра от величины сопротивления нагрузки R_H .

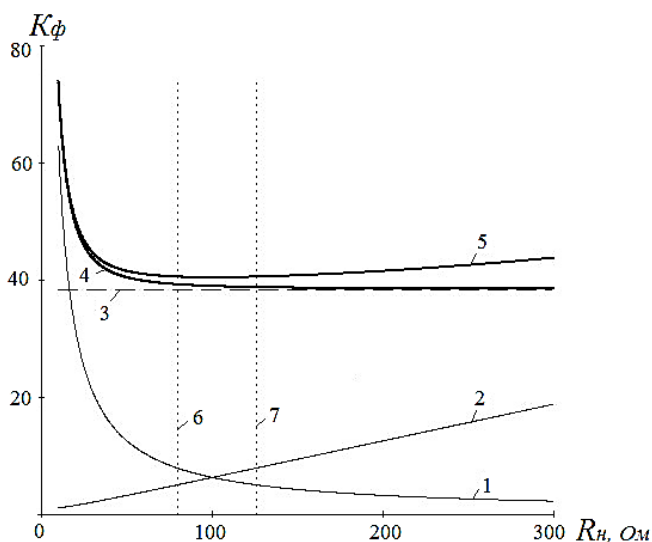


Рис. 3. Зависимость коэффициента фильтрации от сопротивления нагрузки:

1 – для L -фильтра по(1); 2 – для C -фильтра по(2); 3 – для LC -фильтра по(8);

4 – то же по(4); 5 – то же по(9); 6 – граница по условию(6); 7 – то же (7);

исходные данные: $m=2$; $f=50$ Гц; $L=1$ Гн; $C=100$ мкФ

Анализируя рисунок 3, можно сказать, что в диапазоне выполнения условий (6) и (7) можно пользоваться приближенными формулами (8), (9). Погрешность расчета по (8) не превышает 2%, по (9) – не более 6%. При невыполнении условий (6) и (7) погрешность значительно возрастает (рис. 3). Все расчеты подтверждены экспериментами в электронной лаборатории Electronics Workbench [3].

Для RC -фильтра (рисунок 2, в), который применяется в выпрямителях малой мощности, $Z=R$; $Y=j\omega_{\Pi}C$, поэтому, подставляя в (3), получим коэффициент фильтрации:

$$K_{\phi RC} = 1 + \frac{R}{R_H} + j\omega_{\Pi}CR$$

С учетом условий:

$$R = (0,1 - 0,3)R_H; \omega_{\Pi}C \gg 1/R_H;$$

$$|K_{\phi RC}| \approx \omega_{\Pi}RC$$

Коэффициент передачи постоянного напряжения:

$$\lambda = \frac{U_H}{U_d} = \frac{R_H}{R_H + R}$$

Коэффициент сглаживания RC-фильтра:

$$K_{\sigma RC} = \lambda K_{\phi RC} = 1 + j\omega_{\Pi}C(R \parallel R_H) \quad (10)$$

$$|K_{\sigma RC}| \approx \omega_{\Pi}C(R \parallel R_H)$$

По (10) определяют коэффициент сглаживания второго звена для двухзвенного RC-фильтра (рисунок 2, Г):

$$K_{\sigma RC2} = \lambda_2 K_{\phi RC2} = 1 + j\omega_{\Pi}C_2(R_2 \parallel R_H)$$

по модулю:

$$|K_{\sigma RC}|_2 \approx \omega_{\Pi}C_2(R_2 \parallel R_H)$$

При расчете коэффициента фильтрации первого звена в качестве R_H следует подставлять сопротивление $R_2 + R_H \parallel 1/j\omega_{\Pi}C_2$

$$K_{\phi RC1} = 1 + \frac{R_1}{R_2 + R_H \parallel 1/j\omega_{\Pi}C_2} + j\omega_{\Pi}C_1R_1$$

Коэффициент передачи постоянного напряжения:

$$\lambda_1 = \frac{R_H + R_2}{R_H + R_1 + R_2}$$

Окончательные выражения коэффициентов сглаживания:

– для первого звена:

$$K_{\sigma RC1} = \lambda_1 K_{\phi RC1} = 1 + j\omega_{\Pi}C_1[R_1 \parallel (R_2 R_H \parallel 1/j\omega_{\Pi}C_2)]$$

$$|K_{\sigma RC}|_1 \approx \omega_{\Pi}C_1[R_1 \parallel (R_H + R_2)]$$

– для двухзвенного фильтра:

$$K_{\sigma RC} = K_{\sigma RC1} K_{\sigma RC2}$$

Чтобы получить большой коэффициент сглаживания увеличивают число звеньев фильтра.

При больших токах нагрузки и высоких коэффициентах сглаживания применяют многозвенный LC -фильтр (рисунок 2, д). Для него коэффициент сглаживания можно определить по формуле:

$$K_{сгLC} = K_{сгLC1} K_{сгLC2}$$

Также увеличению коэффициента сглаживания способствует выполнение дросселей с дополнительной (компенсационной) обмоткой [1]. Массу и габариты выпрямителя возможно уменьшить следующим способом: нужно заменить пассивные фильтры активными транзисторными [2].

Выводы:

1. Дали определение коэффициента сглаживания, применимое для любых сглаживающих фильтров.
2. Получили расчетные формулы комплексных коэффициентов сглаживания простых и составных пассивных сглаживающих фильтров.
3. Для низкоомной нагрузки эффективен индуктивный фильтр, для высокоомной – емкостный.
4. При использовании приближенных формул в расчетах, их погрешности незначительны, если выполняются условия (6) и (7).

Список литературы

1. Гусев В.Г. Электроника и микропроцессорная техника / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высш. шк., 2005. – 790 с.
2. Руденко В.С. Основы преобразовательной техники / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – М.: Высш. шк., 1980. – 424 с.
3. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB / В.И. Карлащук. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 80 с.