

ОПТИМИЗАЦИЯ Т-ОБРАЗНОГО СГЛАЖИВАЮЩЕГО LCL-ФИЛЬТРА ДЛЯ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Е. И. ГОЛЬДШТЕЙН, А. К. МАЙЕР, М. С. ОСТРАТЬ

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры
приборов и устройств систем автоматики)

В известной нам литературе нет метода расчета оптимального по определенному технико-экономическому показателю (объему активных материалов, габаритному объему, весу, стоимости) Т-образного сглаживающего LCL-фильтра (рис. 1).

Можно рассчитать такой фильтр, задаваясь различными значениями L_1 , L_2 , C , обеспечивающими заданный коэффициент сглаживания, и подсчитывая в каждом случае интересующий нас технико-экономический показатель, после нескольких расчетов остановиться на наиболее приемлемом. Однако такой путь расчета является довольно длительным (метод последовательных приближений), к тому же никогда не будет уверенности, что результат последнего приближения является действительно оптимальным. Поставим задачу получить аналитическое выражение, позволяющее выбрать оптимальное соотношение между L_1 , L_2 и C , при которых определенный технико-экономический показатель (в частности, габаритный объем фильтра) минимален. Коэффициент сглаживания фильтра (рис. 1) определяется уравнением

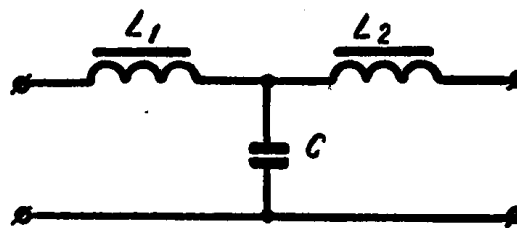


Рис. 1. Т-образный сглаживающий LCL-фильтр.

$$K_{\text{сгл}} = K_{\text{сгл}L1C} \cdot K_{\text{сгл}L2}. \quad (1)$$

При

$$\omega L \gg R_{\text{др}} \quad K_{\text{сгл}L1C} = \omega^2 L_1 C; \quad (2)$$

$$K_{\text{сгл}L2} = \frac{\omega L_2}{R_{\text{др}2} + R_{\text{н}}}. \quad (3)$$

Подставив из (2) и (3) в (1), получим

$$K_{\text{сгл}} = \frac{\omega^3 L_1 L_2 \cdot C}{R_{\text{н}} + R_{\text{др}2}}. \quad (4)$$

Обозначим

$$\Phi = L_1 \cdot L_2 \cdot C = \frac{K_{\text{сгл}}(R_{\text{н}} + R_{\text{др}2})}{\omega^3}; \quad (5)$$

$$X = \frac{L_1 L_2}{C}; \quad Y = \frac{L_1}{L_2}, \quad (6)$$

тогда

$$L_1 L_2 = X \sqrt{\frac{\Phi}{X}} = \sqrt{\Phi \cdot X}; \quad (7)$$

$$L_1 = \sqrt[4]{\Phi \cdot X \cdot Y^2}; \quad (8)$$

$$L_2 = \frac{L_1}{Y} = \sqrt[4]{\frac{\Phi \cdot X}{Y^2}}; \quad (9)$$

$$C = \sqrt{\frac{\Phi}{X}}. \quad (10)$$

Габаритный объем фильтра (рис. 1) складывается из габаритных объемов дросселей L_1 и L_2 и конденсатора C .

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma L1} + V_{\Gamma L2} + V_{\Gamma C}. \quad (11)$$

Используя выражение для габаритного объема из [1], запишем габаритный объем дросселя L_1

$$V_{\Gamma L1} = \left(\frac{N}{n_{\Gamma}}\right)^{0,6} \cdot 2K_{V\Gamma} = L_1^{1,2} \cdot K_{L1V\Gamma}, \quad (12)$$

где

$$K_{L1V\Gamma} = \left(\frac{N'}{n_{\Gamma}}\right)^{0,6} \cdot 2K_{V\Gamma}; \quad (13)$$

$$N' = \frac{I_0^2 \cdot \rho \cdot K_H}{R_{дп} \cdot B_0^2 \cdot K_c^2 \cdot K_0}. \quad (14)$$

$K_H = 1 + \alpha_{\tau} (t_H - 20^\circ)$ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления дросселя при нагреве; α_{τ} — температурный коэффициент меди; t_H — температура нагрева дросселя; n_{Γ} — коэффициент геометрии дросселя; $K_{V\Gamma}$ — коэффициент габаритного объема дросселя; B_0 — постоянная составляющая индукции в стали; K_0 и K_c — коэффициенты заполнения магнитопровода и окна.

По аналогии с (12) габаритный объем дросселя L_2 можно записать

$$V_{\Gamma L2} = L_2^{1,2} \cdot K_{L2V\Gamma}. \quad (15)$$

Габаритный объем конденсатора можно записать

$$V_{\Gamma C} = \gamma_{V\Gamma} \cdot C, \quad (16)$$

где $\gamma_{V\Gamma}$ — удельный габаритный объем конденсатора.

Решая совместно (11), (12), (15), (16), (8), (9) и (10), получим

$$V_{\Gamma} = Y^{0,6} \cdot X^{0,3} \cdot \Phi^{0,3} \cdot K_{L1V\Gamma} + Y^{-0,6} \cdot X^{0,3} \cdot \Phi^{0,3} \cdot K_{L2V\Gamma} + X^{0,5} \cdot \Phi^{0,5} \cdot \gamma_{V\Gamma}. \quad (17)$$

Для нахождения экстремальных значений X и Y необходимо взять частные производные по X и Y от функции (17), приравнять их нулю и решить полученную систему двух уравнений относительно двух неизвестных

$$\frac{\partial V_{\Gamma}}{\partial X} = 0,3 Y^{0,6} \cdot \Phi^{0,3} \cdot K_{L1V\Gamma} \cdot X^{-0,7} + 0,3 Y^{-0,6} \cdot \Phi^{0,3} \cdot K_{L2V\Gamma} \cdot X^{-0,7} - \\ - 0,5 \cdot \Phi^{0,5} \cdot \gamma_{V\Gamma} \cdot X^{-1,5} = 0; \quad (18)$$

$$\frac{\partial V_{\Gamma}}{\partial Y} = 0,6 \cdot \Phi^{0,3} \cdot X^{0,3} \cdot K_{L1V\Gamma} \cdot Y^{-0,4} - 0,6 \Phi^{0,3} \cdot X^{0,3} \cdot K_{L2V\Gamma} \cdot Y^{-1,6} = 0. \quad (19)$$

$$Y^{1,2} = \frac{0,6 \cdot \Phi^{0,3} \cdot X^{0,3} \cdot K_{L1V\Gamma}}{0,6 \cdot \Phi^{0,3} \cdot X^{0,3} \cdot K_{L2V\Gamma}}. \quad (20)$$

С точки зрения электрической прочности изоляции обмоток дросселя целесообразно падение напряжения на фильтре (рис. 1) распределить равномерно на оба дросселя, т. е. активные сопротивления дросселей должны быть равными. Если считать также, что конструкция дросселей L_1 и L_2 одинакова, то

$$K_{L1V\Gamma} = K_{L2V\Gamma} = K_{LV\Gamma}. \quad (21)$$

Тогда

$$Y = 1. \quad (22)$$

Подставив (21) и (22) в (19), получим

$$X^{0,8} = \frac{0,5 \cdot \gamma_{V\Gamma} \cdot \Phi^{0,5}}{\Phi^{0,3} \cdot K_{LV\Gamma} \cdot 0,3(1^{0,6} + 1^{-0,6})} = 0,834 \cdot \Phi^{0,2} \frac{\gamma_{V\Gamma}}{K_{LV\Gamma}}; \\ X = \left[0,834 \cdot \Phi^{0,2} \cdot \frac{\gamma_{V\Gamma}}{K_{LV\Gamma}} \right]^{1,25}. \quad (23)$$

Дополнительные исследования показывают, что при L_1 , L_2 и C , определенным по (15), (16), (17), в которых Y и X подсчитываются по (22) и (23), габаритный объем фильтра (рис. 1) действительно является минимально возможным.

Таким образом, для получения минимального габаритного объема фильтра (рис. 1) необходимо выполнение двух условий:

1. Дроссели L_1 и L_2 должны быть одинаковыми, т. е. $L_1 = L_2$.
2. Значения индуктивностей и емкости необходимо определять при X , подсчитанном по (23).

При проектировании оптимального по габаритному объему фильтра (рис. 1) можно придерживаться следующей последовательности:

1. Выбирают конструкцию магнитопровода для дросселей L_1 и L_2 и задаются средними значениями относительных размеров $x = \frac{b}{a}$; $y = \frac{c}{a}$; $z = \frac{h}{a}$. При использовании дросселей произвольной (оптимальной) геометрии по таблице [1] выбирают значения относительных размеров, при которых габаритный объем дросселя минимален.

2. Выбирают материал магнитопровода.

3. Выбирают тип конденсатора по допустимой температуре, допустимому напряжению пульсаций, частоте, габаритам и другим показателям.

4. Определяют габаритный удельный объем выбранного типа конденсатора используемого номинала

$$\gamma_{V\Gamma \text{ ном}} = \frac{V_{\Gamma \text{ ном}}}{C_{\text{ном}}}$$

Таблица

Пример	l_0, a	КСГЛ	$P, \text{вт}$	$\frac{N^1}{\text{ом}^2 \text{сек}^3}$	$\frac{K_1 V \Gamma}{\text{ом}^{1,2} \text{сек}^{1,2}}$	$\frac{\Phi}{\text{ом} \cdot \text{сек}^3}$	$X, \text{ом}^3$	C_{Φ} мкФ	$L, \text{мгн}$	Типоразмер дросселя	W витки	$\delta, \text{мм}$	$V \Gamma, a$
1	20	141	5	$3,07 \cdot 10^{-3}$	1,91	$1,81 \cdot 10^{-10}$	$0,433 \cdot 10^{-3}$	2000	0,48	ШЛ 16×25	29	0,64	0,748
2	20	141	5	$3,07 \cdot 10^{-3}$	1,43	$1,81 \cdot 10^{-10}$	$0,642 \cdot 10^{-3}$	1500	0,549	Ш 16×32*	23	0,6	0,563
3	20	141	5	$3,07 \cdot 10^{-3}$	1,157	$1,81 \cdot 10^{-10}$	$0,8345 \cdot 10^{-3}$	1200	0,614	$x=2,7$ $y=0,5$ $z=1,5$	16	0,5	0,528
4	100	141	25	0,384	38,5	$3,62 \cdot 10^{-11}$	$7,08 \cdot 10^{-6}$	6000	0,122	ШЛ 25×40	16	2,02	2,45
5	100	141	25	—	—	—	—	2500	$L_1=47$ $L_2=0,0825$	ШЛ 40×80 ШЛ 20×40	20 14	3,0 2,1	4,45

ПРИМЕЧАНИЕ: *) использован броневой дроссель с уменьшенной высотой окна на НО 666000.

Таблица 2

Пример	l_0, a	КСГЛ	$L, \text{мгн}$	$P, \text{вт}$	$N \cdot 10^{-10}$ по расчету	$N \cdot 10^{-10}$ выбранный	Выбранный типоразмер	W витки	$\delta, \text{мм}$	$V \Gamma, a$
6	100	141	0,985	50	1865	2200	2хШЛ40×80	20	1,88	5,12
7	20	141	4,94	10	388	510	ШЛ40×50	17	0,44	2,05

При учете уменьшения емкости за счет понижения рабочей температуры и увеличения частоты удельный габаритный объем конденсатора увеличится.

$$\gamma_{VT} = \frac{\gamma_{VT \text{ ном}}}{\frac{C_{\text{факт}}}{C_{\text{ном}}}} = \frac{\gamma_{VT \text{ ном}}}{K}$$

5. Подсчитывают мощность сглаживающего дросселя (по нагреву)

$$P = \Delta U_{\text{др}} \cdot I_0 = I_0^2 \cdot R_{\text{др}}$$

6. По таблицам [2] выбирают коэффициенты K_c и K_0 , а по [3] — значение B_0 . В первом приближении для стали типа Э-310 может быть использовано $B_0 = 0,8$ тл.

7. Подсчитывают коэффициент N' по (4).

8. Для выбранной конструкции магнитопровода подсчитывают коэффициенты n_{Γ} и K_{VT} [1].

9. Подсчитывают коэффициент $K_{LV\Gamma}$ по (13).

10. Подсчитывают величину Φ по (5).

11. Подсчитывают величину X по (23).

12. Определяют оптимальное значение емкости по (17).

При учете снижения емкости с понижением температуры и при повышенной частоте, необходимо включить емкость больше расчетного значения.

$$C_{\text{факт}} = \frac{C_{\text{расч}}}{K}$$

где $K < 1$ (определяется типом конденсатора, рабочей температурой и частотой).

Полученное фактическое значение емкости округляют до целого значения, реализуемого принятым номиналом конденсатора.

13. Определяют оптимальные значения индуктивности при наименьшей рабочей температуре.

$$L = L_1 = L_2 = \sqrt{\frac{\Phi}{C_{\text{факт}} \cdot K}} = \sqrt{C_{\text{факт}} \cdot K \cdot X}$$

14. Определяют коэффициент сглаживания, обеспечиваемый L_1C -фильтром при наивысшей рабочей температуре.

$$K_{\text{сгл}L_1C} = \omega^2 L_1 C$$

15. Определяют амплитуду пульсаций на емкости $U_{C\sim} = \frac{U_{\sim \text{вх}}}{K_{\text{сгл}L_1C}}$ и сравнивают с допустимым значением.

16. Подсчитывают коэффициент N :

$$N = \frac{Q_c^2 \cdot Q_0}{l_0} = N' \cdot L^2$$

где

Q_c — сечение стали магнитопровода;

Q_0 — площадь окна магнитопровода;

l_0 — средняя длина витка.

17. Выбирают магнитопровод, имеющий $N = \frac{Q_c^2 \cdot Q_0}{l_0}$ не меньше рассчитанного значения.

18. Определяют число витков дросселя:

$$W = \sqrt{\frac{R_{др} \cdot Q_0 \cdot K_0}{\rho \cdot l_0 \cdot K_H}}$$

19. Определяют расчетное сечение провода $S_{пр.р} = \frac{Q_0 \cdot K_0}{W}$ и по таблицам [4] выбирают провод из условия $S_{пр} \leq S_{пр.р}$.

20. Определяют фактическую плотность тока $\Delta = \frac{I_0}{S_{пр}}$ и сравнивают с рекомендуемой в [2].

21. Определяют величину немагнитного зазора

$$\delta = K'_\delta \cdot I_0 \cdot W.$$

Рекомендуемые значения K'_δ приведены в [3]. В первом приближении для стали типа Э-310 можно использовать

$$K'_\delta = 1,6 \cdot 10^{-6} \frac{M}{a \cdot \text{вт}}$$

22. Проверяют, является ли реакция фильтра индуктивной.

Чтобы реакция фильтра (рис. 1) была индуктивной, необходимо выполнение неравенства

$$\omega L > \frac{\frac{1}{\omega C} (R_{др} + R_H)^2 + \frac{L}{C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 + (R_{др} + R_H)^2}$$

23. Определяют габаритный объем фильтра

$$V_\Gamma = 2a^3 \cdot 2K_{\text{вГ}} + C_{\text{факт}} \cdot K \cdot \gamma_{\text{вГ}}$$

По предложенной методике был рассчитан ряд фильтров на токи 20 и 100 а. Результаты расчета сведены в табл. 1. Во всех примерах были приняты

$$\begin{aligned} f &= 800 \text{ гц}, t_H = 105^\circ, K_H = 1,334, \Delta U_\phi = 0,5 \text{ в}, \\ \rho &= 1,72 \cdot 10^{-8} \text{ ом. м}; B_0 = 1 \text{ тл}, \Delta = 3,5 \text{ а/мм}^2, \\ K'_\delta &= 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м/авит}; \text{ тип конденсаторов К-50-3А;} \end{aligned}$$

материал магнитопровода — сталь Э-340.

При расчетах была рассмотрена возможность использования для фильтров дросселей с произвольной (оптимальной) геометрией ($x = 2,7$; $y = 0,5$; $z = 1,5$), обеспечивающей минимальный габаритный объем дросселя (Пример № 3) и дросселей на стандартных сердечниках с уменьшенной высотой окна (Пример № 2).

Для сравнения рассчитан фильтр (рис. 1) по общепринятой методике, когда неизвестно, каким должно быть соотношение между L_1 , L_2 и C (Пример № 5), при этом коэффициенты сглаживания $L_1 C$ и L_2 - звеньев приняты равными.

По результатам расчета видно, что фильтр, рассчитанный по предлагаемому методу (Пример № 4), имеет габаритный объем на 2 литра меньше, чем фильтр, рассчитанный по общепринятой методике с произвольным выбором соотношений между параметрами звеньев (Пример № 5).

Надо отметить что для выпрямителей, работающих на низкоомную нагрузку применение фильтра (рис. 1) более целесообразно, чем индуктивного. Это подтверждается результатами расчета двух индуктивных фильтров (табл. 2), которые обеспечивают такие же коэффициенты сглаживания, как и в примерах 1÷5.

Выводы

1. При использовании дросселей с геометрией, обеспечивающей минимальный габаритный объем, выигрыш в габаритном объеме фильтра составляет всего лишь 30% по сравнению с примером № 1 (используется нормализованный дроссель), поскольку сама методика расчета оптимального по габаритному объему фильтра учитывает выбор геометрии нормализованного дросселя, при которой габаритный объем фильтра получается минимальным.

2. При пользовании нормализованных дросселей с уменьшенной высотой окна (НО 666000) выигрыш в габаритном объеме фильтра по сравнению с примером № 1 составляет 25%.

3. Приведенный метод расчета оптимального по габаритному объему фильтра может быть применен и при оптимизации фильтров по другим технико-экономическим показателям (объему, весу, стоимости).

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Гольдштейн. Некоторые вопросы проектирования оптимальных сглаживающих дросселей. Изв. вузов, «Электромеханика», № 4, 1964.
 2. И. И. Белопольский, Л. Г. Пикалова. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. ГЭИ, 1963.
 3. Е. И. Гольдштейн. Диссертация, Томск, 1964.
 4. Кабели, провода и шнуры электрические. Государственные стандарты СССР, 1964.
-