

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ LC-ФИЛЬТРА ДЛЯ ШИМ СИГНАЛА

В.И. Сафонов

г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет

SELECTION OF LC-FILTER PARAMETERS FOR PWM SIGNAL

V.I. Safonov

Chelyabinsk, South Ural State University

Предложена методика инженерного расчета параметров LC-фильтра для высокочастотного ШИМ сигнала. Получены формулы локальной аппроксимации для основных инженерных характеристик фильтра: коэффициент гармоник, коэффициент эффективности, коэффициент жесткости характеристики. Локальная аппроксимация позволяет выбрать оптимальное соотношение между характеристиками фильтра.

Ключевые слова: LC-фильтр, коэффициент гармоник, коэффициент эффективности, коэффициент жесткости характеристики.

The procedure of engineering design of LC-filter parameters for high-frequency PWM signal has been proposed. The formulas of local approximation for basic filter engineering characteristics such as harmonic content, efficiency factor, characteristic stiffness factor are obtained. The local approximation makes it possible to choose the optimum relationship between the filter characteristics.

Keywords: LC-filter, harmonic content, efficiency factor, characteristics stiffness factor.

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) в последнее время находит все большее применение при осуществлении регулирования систем электроснабжения [1–3]. Поскольку источник ШИМ сигнала не удовлетворяет требованиям системы по коэффициенту гармоник, то между системой и источником ШИМ сигнала используют фильтры. Наиболее простой и удобной схемой такого фильтра является Г-образная схема LC-фильтра (рис. 1). Выбору его параметров посвящено большое количество публикаций [1, 4–6].

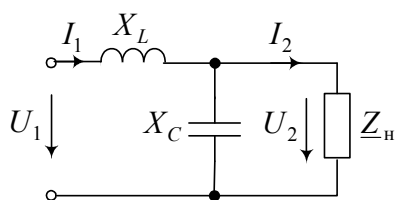


Рис. 1. Схема LC-фильтра

В работе [1] выбор параметров фильтра $L = 2 \cdot 10^{-4}$ Гн и $C = 2 \cdot 10^{-2}$ Ф был выполнен по частоте среза $f_c = 159$ Гц фильтра. Фильтр с такими параметрами безусловно будет подавлять высшие гармоники, но на основной гармонике работает фактически в режиме резонанса $f_0 = 79$ Гц, что отрицательно сказывается на габаритных размерах элементов фильтра.

В работе [4] подбор параметров фильтра осуществлялся только по коэффициенту гармоник, что дает неоднозначное решение задачи и не учитывает важных для практики свойств фильтра. В работе [5] предложена, а в работе [6] усовершенствована методика подбора параметров фильтра. Фильтр должен удовлетворять требованиям: по коэффициенту гармоник, жесткости характеристики фильтра под номинальной нагрузкой и соотношению между действующими значениями входного тока и тока нагрузки.

Методика начинается с подбора фильтра, удовлетворяющего требованиям по коэффициенту гармоник. При этом многие фильтры потом отбраковываются из-за недостаточной жесткости характеристики фильтра под нагрузкой. Поэтому в настоящей работе предложен другой алгоритм подбора параметров фильтра. На первом этапе определяются требования к индуктивному X_L и емкостному X_C сопротивлениям элементов фильтра, обусловленные энергообменом на первой гармонике при заданном сопротивлении $Z_H = Z_H e^{j\phi}$ номинальной нагрузки фильтра. На втором этапе определяют коэффициент гармоник.

Чтобы потеря напряжения в фильтре составляла не более $\alpha_1 = 1$ процента от входного напряжения, сопротивления элементов фильтра должны удовлетворять соотношению $X_L / X_C < 0,01\alpha_1$.

Чтобы уменьшение напряжения U_H фильтра под номинальной нагрузкой составляло не более $\alpha_2 = 1$ процента от напряжения U_{xx} в режиме холостого хода, должно выполняться соотношение $X_L / Z_H < 0,01\alpha_2$.

Указанные требования можно записать через А-параметры четырехполюсника в виде

$$|A| - 1 < 0,01\alpha_1 \text{ и } |B| < 0,01\alpha_2 Z_H. \quad (1)$$

Для каждой конкретной нагрузки $Z = Ze^{j\phi}$ задача на соответствие параметрам жесткости $(U_{xx} - U_H) / U_H < 0,01\alpha_2$ имеет более сложное решение, но во всем диапазоне нагрузок $Z > Z_H$ $0 < \phi < 30^\circ$ оценка (1) дает простую аналитическую запись требований к параметрам фильтра.

Численным экспериментом несложно проверить, что в указанной области требуемые величины для жесткости характеристики под нагрузкой действительно удовлетворяются. При расчетах потери в катушке и конденсаторе приняты равными $\text{tg}(\phi_1) = 0,01$ и коэффициент мощности нагрузки $\cos(\phi) = 0,8$.

В таблице (строка 1) представлена зависимость изменения напряжения под нагрузкой $K = 100 \% (U_{xx} - U_H) / U_H$ от относительного изменения индуктивного $\alpha_L = X_L / 0,01Z_H$ и емкостного $\alpha_C = X_C / Z_H$ сопротивлений фильтра. Зависимость изменения напряжения может быть аппроксимирована функцией $K(\alpha_L) = K_0\alpha_L$, где K_0 – значение коэффициента при $\alpha_L = 1$ и $\alpha_C = 1$.

Следующим практическим требованием к параметрам фильтра является минимизация его габаритов, т. е. минимизация суммы модулей реактив-

ных мощностей его элементов. Это требование было исследовано путем численного моделирования. В области допустимых значений параметров (1) было рассчитано отношение суммы модулей реактивных мощностей $Q_S = X_L I_1^2 + U_2^2 / X_C$ к полной мощности нагрузки $S_2 = U_2 I_2$. Отношение $W = Q_S / S_2$ показывает энергетическую эффективность фильтра. Чем меньше это отношение, тем лучше фильтр как звено в энергообмене между источником и нагрузкой. Численный эксперимент показал, что с увеличением емкостного сопротивления X_C фильтра отношение Q_S / S_2 уменьшается во всем диапазоне нагрузок. При этом изменение индуктивного сопротивления X_L фактически не сказывается на данном процессе.

Результаты численного эксперимента представлены в таблице (строка 2). Параметр $W = Q_S / S_2$ вычислен при нескольких относительных изменениях индуктивного $\alpha_L = X_L / 0,01Z_H$ и емкостного $\alpha_C = X_C / Z_H$ сопротивлений фильтра. Зависимость коэффициента энергоэффективности может быть аппроксимирована функцией $W(\alpha_C) = W_0 / \alpha_C$, где W_0 – значение коэффициента при $\alpha_L = 1$ и $\alpha_C = 1$.

Потери активной мощности на элементах фильтра в основном происходят на основной гармонике. Потери в элементах фильтра учитывались при помощи коэффициента потерь, равного отношению $K_P = \Delta P / S_2$: активной мощности потерь $\Delta P = \text{Re}(Z_L) I_1^2 + \text{Re}(Y_C) U_2^2$ к полной мощности нагрузки $S_2 = U_2 I_2$. Результаты численного моделирования представлены в таблице (строка 3). Зависимость коэффициента потерь может быть аппроксимирована функцией

Результаты численного моделирования

Зависимость изменения напряжения под нагрузкой	α_C / α_L	0,5	1	2
	0,5	0,31	0,308	0,307
	1	0,625	0,619	0,616
	2	1,276	1,249	1,236
Зависимость коэффициента энергоемкости фильтра	α_C / α_L	0,5	1	2
	0,5	2,013	1,004	0,503
	1	2,026	1,008	0,507
	2	2,052	1,016	0,513
Зависимость потерь активной мощности в элементах фильтра	α_C / α_L	0,5	1	2
	0,5	0,04	0,02	0,01
	1	0,041	0,2	0,01
	2	0,042	0,02	0,01
Зависимость амплитуды передаточного коэффициента по напряжению для 50-й гармоники	α_C / α_L	0,5	1	2
	0,5	0,036	0,075	0,16
	1	0,018	0,036	0,075
	2	0,009	0,018	0,036

$K_P(\alpha_C) = K_{P0} / \alpha_C$, где K_{P0} – значение коэффициента при $\alpha_L = 1$ и $\alpha_C = 1$. Зависимости коэффициентов энергоэффективности $W(\alpha_C)$ и потерь $K_P(\alpha_C)$ совпадают. Следовательно, увеличивая емкостное сопротивление фильтра X_C можно не только уменьшить габаритные размеры фильтра, но и уменьшить потери активной мощности в элементах фильтра.

Далее проведем численное исследование зависимости коэффициента гармоник от сопротивлений элементов фильтра. Нормированная АЧХ коэффициента передачи по напряжению $K_U(k) = U_{2(k)} / U_{1(k)}$ представлена на рис. 2. Нормировка выполнена на значение коэффициента для основной гармоники.

Графики построены при значениях параметров: 1) $X_L = 0,01Z_H$, $X_C = Z_H$ (крестики); 2) $X_L = 0,01Z_H$, $X_C = 2Z_H$ (плюсики); 3) $X_L = 0,02Z_H$, $X_C = Z_H$ (точки); 4) $X_L = 0,02Z_H$, $X_C = 2Z_H$ (линия). Построение выполнено для гармоник $k > 50$ в предположении, что тактовая частота ШИМ сигнала $f_c > 2500$ Гц более чем в 50 раз больше, чем частота основной гармоники $f_1 = 50$ Гц.

При численном эксперименте были учтены зависимость потерь в конденсаторе и катушке индуктивности от частоты. Согласно [7] активная проводимость конденсатора для высших гармоник $G_k = G_0 k$, где G_0 – активная проводимость для основной гармоники. Также согласно [7] активное сопротивление катушки для высших гармоник $R_k = R_0 \sqrt{k}$, где R_0 – активная проводимость для основной гармоники. Учет зависимости потерь от частоты приводит к уменьшению коэффициента гармоник на несколько процентов.

Данные численного расчета нормированного АЧХ коэффициента передачи по напряжению представлены в таблице (строка 4) для 50-й гармоники. Зависимость может быть аппроксимирована функцией $N(\alpha_C, \alpha_L) = N_0 \alpha_C / \alpha_L$, где N_0 – значение

коэффициента при $\alpha_L = 1$ и $\alpha_C = 1$. Из рис. 2 видно, что полученное для 50-й гармоники зависимость для параметров элементов фильтра сохраняется и для гармоник $k > 50$. Следовательно, для коэффициента гармоник $K_G = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_{2(k)}^2} / U_{2(1)}$

также будет выполняться аппроксимационная формула $K_G(\alpha_C, \alpha_L) = K_{G0} \alpha_C / \alpha_L$.

В результате численного анализа были получены аппроксимационные формулы для относительных изменений основных характеристик фильтра:

$$K(\alpha_L) = K_0 \alpha_L \quad (\text{коэффициента жесткости}); \quad (2)$$

$$W(\alpha_C) = W_0 / \alpha_C \quad (\text{коэффициента энергоэффективности}); \quad (3)$$

$$K_G(\alpha_C, \alpha_L) = K_{G0} \alpha_C / \alpha_L \quad (\text{коэффициента гармоник}); \quad (4)$$

$$K_P(\alpha_C) = K_{P0} / \alpha_C \quad (\text{коэффициент потерь}). \quad (5)$$

Формулы (2)–(5) справедливы при незначительном (не более чем в 2 раза) отклонении параметров фильтра от базовых значений и являются фактически результатом условной аппроксимации характеристик фильтра. Формулы (2)–(5) применимы только в области допустимых значений параметров фильтра, когда индуктивное сопротивление фильтра много меньше сопротивления номинальной нагрузки $X_L \ll Z_H$, а емкостное сопротивление сравнимо или больше номинального сопротивления $0,5Z_H < X_C$. Формулы (2)–(5) удобны при инженерном расчете фильтра, когда необходимо подобрать оптимальное соотношение свойств фильтра.

Таким образом, алгоритм синтеза фильтра состоит из двух основных этапов:

1) определение предварительных параметров фильтра по соотношениям (1),

2) уточнение параметров фильтра по аппроксимационным формулам (2)–(5).

Если в результате не будут получены требуемые характеристики фильтра, необходимо изменить параметры предварительной оценки и повторить п. 2 алгоритма.

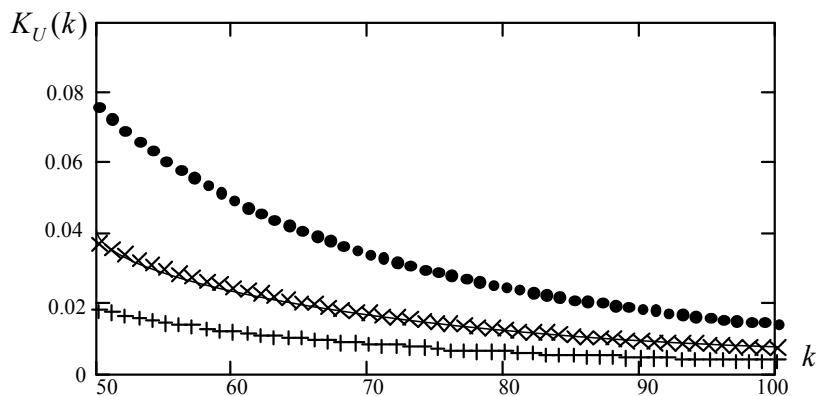


Рис. 2. Зависимость коэффициента гармоник

По сравнению с работой [6] данный алгоритм намного проще. Следует отметить, что при получении аппроксимационных формул (2)–(5) было введено обязательное требование $k > 50$ для высших гармоник. Т. е. предложенный алгоритм может использоваться только для высокочастотных ШИМ источников. Алгоритм, рассмотренный в работах [5, 6] позволяет синтезировать фильтры при произвольном наборе частот высших гармоник.

На рис. 3 показана область возможных значений индуктивных и емкостных сопротивлений фильтра.

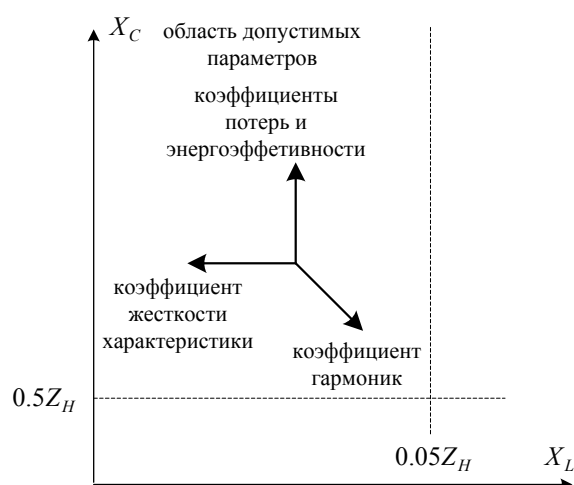


Рис. 3. Диаграмма свойств фильтра

Стрелками показаны направления улучшения каждой из обозначенных ранее характеристик фильтра. Из рис. 3 видно, что одновременное улучшение всех характеристик фильтра невозможно. Требования к коэффициенту гармоник закреплены в ГОСТ 13109-97 и не могут быть пересмотрены. В случае использования источника ШИМ для регулирования систем энергоснабжения напряжением 10 кВ [1–3] или 0,4 кВ существенным становится требование к габаритным размерам, которое в рассмотренном алгоритме учтено коэффициентом энергоэффективности. Улучшение энергоэффективности фильтра невозможно без одновременного

ухудшения жесткости характеристики фильтра под нагрузкой или коэффициента гармоник.

Снижение жесткости характеристики под нагрузкой может быть устранено усложнением системы управления. Введя датчики тока и напряжения нагрузки, возможно по определенному алгоритму изменять глубину модуляции ШИМ сигнала, увеличивая амплитуду источника и компенсируя тем самым снижение напряжения под нагрузкой.

Литература

1. Хохлов, Ю.И. Моделирование электромагнитных процессов в компенсированном выпрямителе с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ / Ю.И. Хохлов, Д.В. Гиззатулин, А.Г. Осипов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – №11. – С. 32–38.
2. Гиззатулин, Д.В. Экспериментальное исследование компенсированного выпрямителя с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ / Д.В. Гиззатулин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – № 32. – 2010. – С. 32–35.
3. Осипов, А.Г. Экспериментальное исследование компенсированного выпрямителя с векторным управлением / А.Г. Осипов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – № 32. – С. 36–39.
4. Захаров, А.С. Расчет выходного фильтра ШИМ инвертора на заданный коэффициент гармоник напряжений на нагрузке / А.С. Захаров // Силовая электроника. – № 1. – 2005. – С. 46–49.
5. Мыцык, Г.С. Поисковое проектирование устройств силовой электроники (трансформаторно-полупроводниковые устройства): учебное пособие / Г.С. Мыцык А.В. Берилев, В.В. Михеев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 284 с.
6. Мыцык, Г.С. Модификация упрощенной методики расчета Г-образного LC-фильтра // Г.С. Мыцык, Пью Мьинт Тхейн, Хлаинг Мин У. // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 1(45). – С. 18–26.
7. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятия / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272 с.

Поступила в редакцию 17.05.2012 г.

Сафонов Валерий Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов: теория электрических цепей и электромагнитных полей. Контактный телефон: 8-(351)-2679151.

Safonov Valeriy Ivanovich – Candidate of Science (Physics and Mathematics), associate professor, Associate Professor of “Power-Supply Systems” Department of South Ural State University. Research interests – electric circuit and electromagnetic field theory. Contact telephone number: 8-(351)-2679151.