

УДК 620.314 (075.8)

UDC 620.314 (075.8)

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФИЛЬТРОВ
СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ****THE METHOD OF CALCULATION OF
FILTERS FOR STATIC CONVERTERS OF
ELECTRIC POWER**

Григораш Олег Владимирович
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
grigorasch61@mail.ru
РИНЦ SPIN-код 4729-2767

Grigorash Oleg Vladimirovich
Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the
chair, grigorasch61@mail.ru
RSCI SPIN-code 4729-2767

Ивановский Олег Якович
магистр

Ivanovsky Oleg Yarkovich
master student

Туаев Александр Сергеевич
магистр
*Кубанский государственный аграрный
университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар,
Россия*

Tuaev Alexander Sergeevich
master student
*Kuban state agrarian University named after
I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia*

Одним из важных вопросов при проектировании статических преобразователей электроэнергии – выпрямителей и инверторов, является расчет параметров выходных и входных фильтров. Выходные фильтры предназначены для улучшения качества выходного напряжения преобразователей электроэнергии, а входные – для снижения уровня пульсаций входного напряжения преобразователя, возникающих при коммутации силовых полупроводниковых приборов, и сглаживания пульсаций тока, потребляемого от источника электроэнергии. Сложность аналитического описания гармонического состава выходного и входного напряжения выпрямителей и инверторов затрудняет разработку точных методов расчета параметров их фильтров. В то же время, если учесть дискретность ряда возможных параметров реальных элементов фильтра, практическая ценность таких методик с высокой точностью анализа гармонических составляющих - незначительна. В статье предлагается методика упрощенного расчета выходных и входных фильтров пассивных LC-фильтров выпрямителей и инверторов. При этом, практика математического моделирования и проектирования преобразователей показала, что расчеты параметров фильтров выпрямителей и инверторов не значительно отличаются друг от друга. Поэтому, в приведенных аналитических выражениях для расчета параметров фильтра выпрямителя применяется коэффициент пульсаций, а при необходимости расчета фильтров инвертора, вместо коэффициента пульсаций в формулы подставляется значение коэффициент гармоник, кроме того, учитывается значение коэффициента мощности нагрузки

One of the important issues in the design of static converters of electric power, i.e. rectifiers and inverters, is to calculate the parameters of the output and the input filters. Output filters are designed to improve the quality of output voltage of inverters, and input filters are created to reduce ripple of the input voltage of the converter that occur when commutating power semiconductor devices, and smoothing fluctuations of the current consumed from the power supply. The complexity of analytical description of the harmonic composition of the output and the input of the voltage rectifiers and inverters makes it difficult to develop some accurate methods for calculating the parameters of their filters. At the same time, considering the discreteness of the number of possible parameters of real elements of the filter, the practical value of such techniques with a high analysis accuracy of the harmonic components is negligible. In this article, we suggest the technique of the simplified calculation of output and input filters for passive LC filters rectifiers and inverters. At the same time, the practice of mathematical modeling and design of transducers has shown that the calculations of the filter parameters for rectifiers and inverters are not significantly different from each other. Therefore, the analytical expressions for calculation of the filter parameters of rectifier used ripple coefficient, and if necessary the calculation of the filters of the inverter, instead of the pulse number in the formula can be substituted with the value of the harmonic; in addition, we have also taken into account the value of the load power factor

Ключевые слова: АВТОНОМНЫЕ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, СТАТИЧЕСКИЙ

Keywords: AUTONOMOUS POWER SUPPLY
SYSTEMS, STATIC POWER CONVERTER,

Doi: 10.21515/1990-4665-133-064

Широкое распространение в автономных системах электроснабжения (АСЭ) нашли статические преобразователи электроэнергии (СПЭ), выполненные на базе силовых электронных приборов. СПЭ выполняют в основном две функции: согласование параметров электроэнергии источника с нагрузкой и обеспечение стабилизации напряжения [1, 2].

Одним из важных вопросов при проектировании СПЭ является расчет параметров выходных и входных фильтров. Как известно, выходные фильтры, обеспечивают требуемое качество напряжения на выходе преобразователя, входные – исключают влияние коммутационных процессов, протекающих в силовых схемах СПЭ на источники электроэнергии [3].

Выпрямители и инверторы являются самыми распространёнными типами СПЭ, применяемых как в стационарных, так и в автономных системах электроснабжения (АСЭ). Рациональным и наиболее распространённым типом фильтров СПЭ с выходом на постоянном и переменном токе являются Г-образные пассивные LC-фильтры.

Принцип работы фильтров выпрямителей основан на сглаживании пульсаций выходного напряжения, а выходных фильтров инверторов – подавление высших гармоник, вносящих искажение в форму выходного напряжения преобразователя. Сложность аналитического описания гармонического состава выходного напряжения выпрямителей и инверторов затрудняет разработку точных методов расчета параметров их выходных фильтров. В то же время, если учесть дискретность ряда возможных параметров реальных элементов фильтра, практическая ценность таких методик с высокой точностью анализа гармонических

составляющих незначительна [3, 4]. Поэтому в настоящее время в основу методик расчета пассивных фильтров СПЭ положены вопросы оптимизации критериев их эффективности.

Основными критериями оценки эффективности фильтров СПЭ, как правило, являются массогабаритные показатели и КПД.

Практика проектирования показала, что оптимизировать параметры входных и выходных LC-фильтров в отрыве от других функциональных элементов СПЭ не даёт положительных результатов в оптимизации критериев эффективности СПЭ в комплексе. Поскольку кроме массогабаритных показателей (МГП) и КПД СПЭ оцениваются по экономическим показателям, показателям надежности и электромагнитной совместимостью в работе с другими функциональными элементами СЭС. Поэтому предлагается методика упрощенного расчета параметров LC-фильтров СПЭ, в основу которой положен критерий минимума массы и габаритов.

На примере однополупериодной схемы выпрямителя рассмотрим методику расчета его выходного Г-образного LC-фильтра. На рисунке 1, *a* приведена принципиальная электрическая схема замещения выпрямителя, где показаны: *S* – ключ; *E* – источник питания переменного тока; *LC* – Г-образный фильтр; *R_H* – активная нагрузка.

Важным является уравнение, связывающее напряжение на нагрузке – *U_H*, с *E* и скважностью импульсов λ

$$U_H = \frac{R_H E \lambda}{R_H + R}, \quad (1)$$

где *R_H* – сопротивление нагрузки; *R* – сопротивление, учитывающее общие потери в фильтре (см. рисунок 1, *a*).

Основным требованием, предъявляемым к выходным фильтрам выпрямителей, является обеспечение заданного значения коэффициента

пульсаций K_{II} . Максимальное значение коэффициента пульсаций при скважности импульсов

$$\lambda = \frac{t_{II}}{T_K} = 0,5, \quad (2)$$

определяется по формуле

$$K_{II\max} = \frac{(R + R_H)T_K^2}{64R_H LC}, \quad (3)$$

где t_{II} – длительность импульса; T_K – период коммутации (рисунок 1, б).

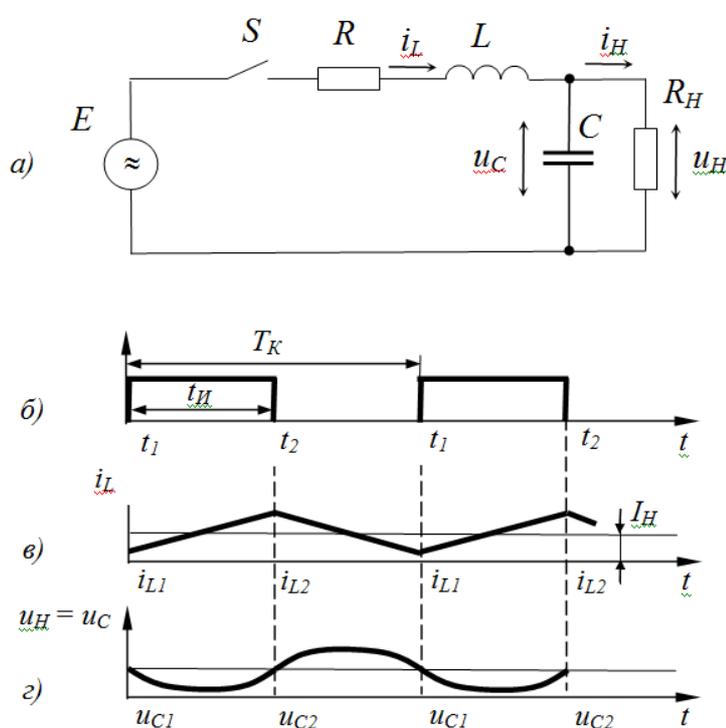


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема замещения однополупериодного выпрямителя (а) и диаграммы тока и напряжений, поясняющие принцип его работы (б – г)

С учетом (3) заданное значение коэффициента пульсаций может быть обеспечено при условии

$$LC \geq \frac{T_K^2}{64K_{II}}, \quad (4)$$

или через относительное значение резонансной частоты фильтра

$$\omega_{\phi}^* \leq \frac{8}{2\pi} \sqrt{K_{II}}. \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) позволяют при выбранной частоте широтно-импульсной модуляции (ШИМ) f_K и заданном значении K_{II} определить параметры индуктивности L и емкости фильтра C .

Индуктивность фильтра L определяет значение коэффициента

$$K_i = \frac{I_{\max}}{I_H}, \quad (6)$$

где I_{\max} – максимальный ток; I_H – среднее значение тока нагрузки (см. рисунок 1, в).

От значения коэффициента K_i зависят МГП статических преобразователей в целом. Результаты совместной оптимизации показывают, что целесообразно для выходных фильтров выбирать режим работы с непрерывным током i_L и значениями $K_i = 1,2-1,3$. Тогда при максимально возможных пульсациях и скважности импульсов $\lambda = 0,5$

$$K_i = 1 + \frac{0,25E_{\max}}{2f_K L I_H}, \quad (7)$$

где E_{\max} – максимальное значение входной ЭДС (см. рисунок 1, а).

Таким образом, при выборе индуктивности фильтра необходимо чтобы выполнялось условие

$$L \geq \frac{0,25E_{\max}}{(0,4...0,6)f_K I_H}. \quad (8)$$

С учетом условий (4) и (8) определяется емкость C конденсатора фильтра.

Полученные значения L и C проверяются на соответствие требованиям по ограничению динамических отклонений по условию

$$\Delta I_H \sqrt{\frac{L}{C}} \leq \Delta U_{H \max}, \quad (9)$$

где ΔI_H – максимальный коммутирующий ток нагрузки; ΔU_{Hmax} – допустимое максимальное отклонение напряжения на нагрузке.

Если условие (9) не выполняется, то следует увеличить емкость фильтра C , что естественно приведет к увеличению массы выходного фильтра.

Кроме индуктивности L дроссель фильтра характеризуется также допустимыми максимальным мгновенным и действующим значениями протекающего через него тока. В режиме непрерывного тока i_L , должно выполняться условие $1 \leq K_i \leq 2$. Максимальное мгновенное значение тока определяется из (6). Действующее значение тока

$$I_L = I_H \sqrt{\frac{(K_i - 1)^2 + 3}{3}}. \quad (10)$$

Режим работы конденсатора фильтра характеризуется значением постоянной составляющей напряжения U_{Co} , равным среднему значению напряжения на нагрузке U_H , и значением переменной составляющей u , совпадающим со значением пульсации напряжения на нагрузке и определяемым через коэффициент пульсаций K_{II} согласно (1) и (3).

В инверторах с синусоидальной ШИМ на повышенной частоте тока также применяются простейшие LC-фильтры. Сложность описания гармонического состава выходного напряжения при ШИМ затрудняет разработку точных методик расчета параметров таких фильтров.

Практика математического моделирования и разработки преобразователей с промежуточным звеном повышенной частоты показала, что на этапе проектирования СПЭ достаточно использовать рассмотренную методику расчета параметров LC-фильтра для выпрямителей. При этом полагается, что коэффициент пульсаций K_{II} , оценивающий качество напряжения постоянного тока, и коэффициент гармоник K_G , оценивающий качество напряжения переменного тока, близки по своему значению и физическому смыслу [1, 3].

Основными аналитическими выражениями для расчета фильтров инверторов, при рассмотренном допущении, являются (4), (8) и (9) в которых значение коэффициента пульсаций K_{II} следует заменить на коэффициент гармоник K_G , а ток нагрузки I_H на амплитудное значение тока нагрузки 1-й гармоники. Исходным режимом для расчета фильтра инвертора является наиболее «тяжелый» относительно коэффициента гармоник K_G , когда скважность импульса $\lambda = 0,5$.

Учитывая, что емкость конденсатора выходного фильтра инвертора создает дополнительную токовую нагрузку СПЭ, ее реакцию целесообразно компенсировать. К примеру, если характер нагрузки активный или близок к нему, емкость конденсатора фильтра создает дополнительную S создает дополнительную мощность на выходе

$$Q_{C\phi} = U_H^2 \omega_1 C_\phi, \quad (11)$$

где ω_1 – круговая частота основной гармоники напряжения на нагрузке; U_H – действующее значение основной гармоники напряжения на нагрузке.

Для компенсации этой реактивной мощности необходимо параллельно конденсатору фильтра (рисунок 1, а) включить дроссель с индуктивностью L_K , обеспечивающий возникновение резонанса тока на основной гармонике, которая определяется по формуле

$$L_K = \frac{1}{\omega_1^2 C_\phi}. \quad (12)$$

Такая структура выходного LC-фильтра обеспечивает улучшение МГП инвертора. Однако целесообразность ее использования определяется на основе оптимизации силовой схемы инвертора. Для инвертора мощностью меньше 1 кВт введение дополнительного дросселя в структуру фильтра ухудшает МГП преобразователя.

В отличие от выпрямителей в инверторах с синусоидальной ШИМ применяются конденсаторы переменного тока, что значительно улучшает их МГП.

Как правило, кроме выходного фильтра инверторы имеют входной фильтр, предназначенный для снижения уровня пульсаций входного напряжения преобразователя и сглаживания пульсаций тока, потребляемого от источника электроэнергии переменного тока.

Когда АСЭ сравнительно с инвертором имеет значительно больше массу (в 10 раз и более), то, как правило, входной фильтр выполняет только одну функцию – подавляет всплески напряжения, обусловленные коммутациями силовых полупроводниковых приборов и наличием паразитных индуктивностей (индуктивностей рассеяния трансформаторов). В этом случае входной фильтр содержит только конденсатор, емкость которого определяется по формуле

$$C_{BX} \geq \frac{I_H T_K}{2U_{Cm}}, \quad (13)$$

где U_{Cm} – амплитудное значение напряжения на конденсаторе.

В общем случае параметры входного фильтра инверторов определяются из следующих зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} L_{BX} &\geq \frac{U_{Cm}}{\omega_K K_I I_{BX1m}}, \\ C_{BX} &\geq \frac{I_{BX1m} (K_I + 1)}{2\omega_K U_{Cm}}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где $\omega_K \geq (3...4)\omega_{\phi BX}$ – угловая частота первой гармоники; $\omega_{\phi BX} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ –

собственная частота входного фильтра; $K_I = \frac{I_{BX1m}}{I_{I1m}}$ – коэффициент

передачи тока; I_{BX1m} – амплитудное значение 1-й гармоники входного

тока; $I_{П1m}$ – амплитудное значение 1-й гармоники источника электроэнергии.

С учетом рассмотренных аналитических выражений предлагается следующая методика упрощенного расчета LC-фильтров СПЭ.

Исходные данные: диапазон изменения и допустимые отклонения входного и выходного напряжения при коммутации; коэффициент пульсаций $K_{П}$ (для выпрямителей); коэффициент гармоник $K_{Г}$ (для инверторов); номинальная мощность; характер нагрузки (для инверторов).

1. Определяется коммутационная частота f_k и коэффициент K_i (для СПЭ с $P_H \geq 1 \text{ кВт}$, $f_k \approx (5 \dots 10) \text{ кГц}$, $K_i = 1, 2 \dots 1, 3$).

2. Из (1) с учетом обеспечения запаса коэффициента скважности импульсов ($\gamma = 0,9$) определяется для U_{Hmax} минимально допустимое значение входного напряжения источника E_{min} и значение коэффициента трансформации трансформатора СПЭ.

3. По (4), (9) с учетом (6) определяются параметры выходного фильтра – индуктивность L и емкость C .

4. С учетом вычисленных значений токов и напряжений, осуществляется выбор дросселей и конденсаторов.

5. По выбранному значению K_i и рассчитанному K_U (отношение максимального значения напряжения на нагрузке к минимальному) выбираются требуемые силовые полупроводниковые приборы (транзисторы, тиристоры, диоды).

6. При расчете фильтров инверторов с синусоидальной ШИМ необходимо учитывать значения коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_H$.

7. В соответствии с (13) или (14) проводится расчет параметров входного фильтра инвертора.

Дальнейшие исследования, позволяющие улучшить эксплуатационно-технических характеристик СПЭ, в том числе, их

входных и выходных фильтров должны быть направлены на внедрение в структуру преобразователей трансформаторов с вращающимся магнитным полем [5, 6], а также изучение электромагнитной совместимости основных функциональных узлов преобразователей и самих СПЭ в составе АСЭ [7].

Список литературы

1. Богатырев Н.И. Преобразователи электрической энергии: основы теории, расчета и проектирования [Текст] / Н. И. Богатырев, О. В. Григораш, Н. Н. Курзин и др. – Краснодар. – 2002. – 358 с.
2. Григораш О. В. Статические преобразователи электроэнергии [Текст] / О. В. Григораш, О. В. Новокрещенов, А. А. Хамула и др. – Краснодар. – 2006. – 264 с.
3. Григораш О. В. Статические преобразователи и стабилизаторы автономных систем электроснабжения [Текст] / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, А. Е. Усков. – Краснодар. – 2011. – 188 с.
4. Григораш О.В. Инверторы солнечных электростанций с улучшенными техническими характеристиками / О.В. Григораш, А.Е. Усков, Я.А. Семёнов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №05 (099). С. 101 – 111.
5. Григораш О. В. Преобразователи электрической энергии на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем для систем автономного электроснабжения [Текст] / О. В. Григораш // Промышленная энергетика. – 1997. – № 7. – С.21– 25.
6. Григораш О. В. К вопросу применения трансформаторов с вращающимся магнитным полем в составе преобразователей электроэнергии [Текст] / О. В. Григораш, Ю. А. Кабанков // Электротехника. – 2002. – № 3. – С.22–26.
7. Григораш О. В. К вопросу электромагнитной совместимости основных узлов систем автономного электроснабжения [Текст] / О. В. Григораш, А. В. Дацко, С. В. Мелехов // Промышленная энергетика. – 2001. – № 2. – С.44– 47.

References

1. Bogatyrev N.I. Preobrazovateli jelektricheskoj jenerгии: osnovy teorii, rascheta i proektirovanija [Tekst] / N. I. Bogatyrev, O. V. Grigorash, N. N. Kurzin i dr. – Krasnodar. – 2002. – 358 s.
2. Grigorash O. V. Sticheskie preobrazovateli jelektrojenerгии [Tekst] / O. V. Grigorash, O. V. Novokreshhenov, A. A. Hamula i dr. – Krasnodar. – 2006. – 264 s.
3. Grigorash O. V. Sticheskie preobrazovateli i stabilizatory avtonomnyh sistem jelektrosnabzhenija [Tekst] / O. V. Grigorash, Ju. P. Stepura, A. E. Uskov. – Krasnodar. – 2011. – 188 s.
4. Grigorash O.V. Invertory solnechnyh jelektrostancij s uluchshennymi tehničeskimi harakteristikami / O.V. Grigorash, A.E. Uskov, Ja.A. Semjonov // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2014. – №05 (099). S. 101 – 111.
5. Grigorash O. V. Preobrazovateli jelektricheskoj jenerгии na baze transformatorov s vrashhajushhimsja magnitnym polem dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija [Tekst] / O. V. Grigorash // Promyshlennaja jenergetika. – 1997. – № 7. – S.21– 25.

6. Grigorash O. V. K voprosu primeneniya transformatorov s vrashhajushhimsja magnitnym polem v sostave preobrazovatelej jelektrojenergii [Tekst] / O. V. Grigorash, Ju. A. Kabankov // Jelektrotehnika. – 2002. – № 3. – S.22–26.

7. Grigorash O. V. K voprosu jelektromagnitnoj sovmestivosti osnovnyh uzlov sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija [Tekst] / O. V. Grigorash, A. V. Dacko, S. V. Melehov // Promyshlennaja jenergetika. – 2001. – № 2. – S.44– 47.