

Поступила в редакцию 18.06.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_3_93

УДК 621.314

В.В. Ваняев

РАСЧЕТ ЕМКОСТНОГО ФИЛЬТРА МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Статья посвящена вопросам расчета емкостного фильтра мостового m -пульсного выпрямителя, являющегося входным звеном AC/DC преобразователя. Получены упрощенные аналитические выражения для определения основных параметров фильтра с достаточной для инженерных расчетов точностью. Приведен пример расчета однофазного мостового выпрямителя.

Ключевые слова: емкостной фильтр, коэффициент пульсаций напряжения, мостовой выпрямитель.

I. Введение

При проектировании AC/DC преобразователей с мостовым выпрямителем с выходным возникает задача определения выходного напряжения выпрямителя C -фильтром (напряжения нагрузки), емкости фильтра и типа применяемых конденсаторов при заданной величине коэффициента пульсаций этого напряжения.

Известные решения этой задачи [1-6] либо достаточно приближенные, либо выполнены для однофазного выпрямителя и описывается аналитическими выражениями, требующими вспомогательных вычислений, что не вполне удобно в инженерных расчетах. Цель данной работы – совершенствование методики проектирования входных емкостных фильтров AC/DC преобразователей.

II. Основные расчетные соотношения

Упрощенное решение задачи проектирования базируется на использовании диаграмм выходного напряжения мостового m -пульсного выпрямителя с емкостным фильтром и тока конденсатора фильтра, приведенных на рис. 1.

Диаграммы построены при допущениях:

- сопротивление питающей сети переменного напряжения равно нулю;
- падение напряжения на диодах выпрямителя равно нулю;

- внутреннее сопротивление конденсатора не учитывается;
- нагрузка выпрямителя характеризуется постоянством потребляемого тока.

В работе фильтра на интервале повторяемости с угловой длительностью (где m -пульсность выпрямителя) имеют место два интервала: интервал зарядки конденсатора фильтра в пределах угла θ и интервал разряда длительностью $2\pi/m - \theta$ (рис. 1).

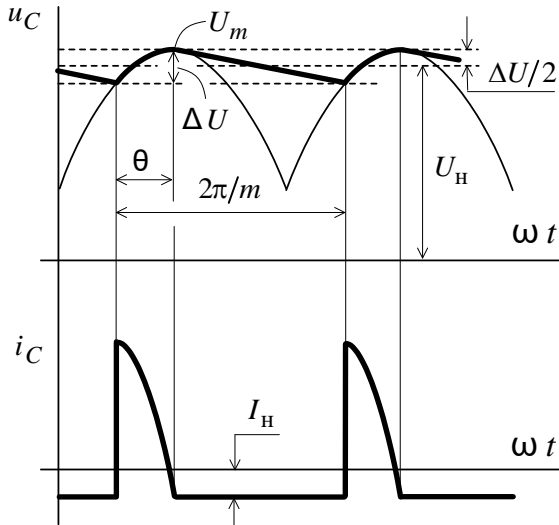


Рис. 1. Диаграммы работы выпрямителя с емкостным фильтром

При сделанных допущениях напряжение конденсатора в процессе зарядки равно напряжению сети и возрастает с некоторого минимального значения равного $U_m - \Delta U$ до уровня амплитуды U_m . При этом напряжение и ток конденсатора описываются следующими выражениями:

$$u_C = U_m \cdot \sin \omega t; \quad (1)$$

$$i_C = C \cdot \omega \cdot U_m \cdot \cos \omega t. \quad (2)$$

где C – емкость конденсатора фильтра; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 314 \text{ с}^{-1}$ круговая частота сети.

По окончании зарядки начинается процесс разряда конденсатора практически неизменным при малых ΔU током нагрузки равным:

$$i_c = -I_n = -\frac{P_n}{U_n}, \quad (3)$$

где P_n – мощность, передаваемая в нагрузку; U_n – среднее значение напряжения нагрузки.

Приращение ΔU напряжения на конденсаторе в пределах угла θ в соответствии с диаграммой на рис. 1 определяется по формуле:

$$\Delta U = U_m - U_m \cdot \sin(0,5 \cdot \pi - \theta) = U_m \cdot (1 - \cos \theta). \quad (4)$$

Из диаграмм также следует формула для определения среднего значения U_n напряжения нагрузки:

$$U_n = U_m - 0,5 \cdot \Delta U = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{1 + 0,5 \cdot k_n}, \quad (5)$$

где U – действующее линейное напряжение на входе выпрямителя; $k_n = \Delta U / U_n$ – коэффициент пульсаций выходного напряжения (напряжения нагрузки).

Емкостной фильтр увеличивает среднее значение выходного напряжения выпрямителя, поэтому величина U_n должна удовлетворять условию:

$$U_n > \frac{m}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \frac{\pi}{m}, \quad (6)$$

где m – пульсность выпрямителя, а задаваемая величина k_n , согласно (5) и (6) не должна превышать значений, определяемых выражением:

$$k_n = 2 \left[\left(\frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \right)^{-1} - 1 \right]. \quad (7)$$

Решая совместно (4) и (5), находим угловую длительность θ :

$$\theta = \arccos \frac{U_n - 0,5 \cdot \Delta U}{U_n + 0,5 \cdot \Delta U} = \arccos \frac{1 - 0,5 \cdot k_n}{1 + 0,5 \cdot k_n}. \quad (8)$$

Требуемое значение емкости конденсатора фильтра, обеспечивающее заданное значение k_n , определяется выражением:

$$C = \frac{I_{\text{н}} \cdot (2\pi / m - \theta)}{\omega \cdot \Delta U} = \frac{P_{\text{н}} \cdot (2\pi / m - \theta)}{\omega \cdot k_n \cdot U_{\text{н}}^2}. \quad (9)$$

При выборе электролитического конденсатора фильтра необходимо знать величину действующего значения протекающего через него тока. В соответствии с выражениями (2) и (3) и диаграммами работы, оно определяется по формуле:

$$\begin{aligned} I_{RMS} &= \sqrt{\frac{m}{2\pi} \cdot \left[\int_{\pi/2-\theta}^{\pi/2} (C \cdot \omega \cdot U_m \cdot \cos \omega t)^2 d\omega t + \int_0^{2\pi/m} I_{\text{н}}^2 dt \right]^2} = \\ &= \sqrt{\frac{m \cdot (C \cdot \omega \cdot U)^2}{2\pi} \cdot \left(\theta - \frac{1}{2} \cdot \sin 2\theta \right) + \left(1 - \frac{m \cdot \theta}{2\pi} \right) \cdot \left(\frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \right)^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

При малых углах θ ток конденсатора имеет практически треугольную форму, что позволяет привести выражение (10) к еще более простому виду:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot m \cdot \theta^3}{3} \cdot (C \cdot f \cdot U)^2 + \left(1 - \frac{m \cdot \theta}{2\pi} \right) \cdot \left(\frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \right)^2}. \quad (11)$$

Поскольку в преобразователях нагрузка выпрямителя характеризуется импульсным потребляемым током повышенной частоты, действующее значение тока конденсатора фильтра необходимо определять по формуле:

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{RMS}^2 + I_{RMSn}^2}, \quad (12)$$

где I_{RMSn} – действующее значение переменной составляющей тока нагрузки.

Действующее значение фазного тока, потребляемого мостовой схемой выпрямителя, будет:

$$I_{RMS\Phi} = \sqrt{\frac{m}{2\pi} \cdot k_B \cdot \left[(C \cdot \omega \cdot U)^2 \cdot \left(\theta - \frac{1}{2} \cdot \sin 2\theta \right) + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot C \cdot \omega \cdot U \cdot \left(\frac{P_H}{U_H} \right) \cdot (1 - \cos \theta) + \theta \cdot \left(\frac{P_H}{U_H} \right)^2 \right]}, \quad (13)$$

или

$$I_{RMS\Phi} = \sqrt{2} \cdot C \cdot \omega \cdot U \cdot \sqrt{\frac{m \cdot \theta}{2\pi} \cdot k_B \cdot \left[\left(\frac{1}{\sqrt{2} \cdot C \cdot \omega \cdot U} \cdot \frac{P_H}{U_H} + \frac{\theta}{2} \right)^2 + \frac{\theta^2}{12} \right]}, \quad (14)$$

где k_B – коэффициент схемы выпрямителя ($k_B = 1$ в однофазной схеме; $k_B = 2/3$ в трехфазной схеме).

III. Пример расчета

Определить среднее значение U_H напряжения нагрузки, подключенной к выходу однофазного мостового выпрямителя с C -фильтром, величину емкости конденсатора фильтра и действующее протекающего по нему тока при заданных величинах: действующего линейного напряжения сети $U = 220$ В; частоты сети $f = 50$ Гц; коэффициента пульсаций напряжения нагрузки $k_n = 0,2$; мощности нагрузки $P_H = 2$ кВт. По (5) определяем среднее значение напряжения нагрузки:

$$U_H = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{1 + 0,5 \cdot 0,2} = 283 \text{ В.}$$

Согласно (8), определяем угловую длительность θ протекания тока зарядки конденсатора:

$$\theta = \arccos \frac{1 - 0,5 \cdot 0,2}{1 + 0,5 \cdot 0,2} = 0,613 \text{ рад.}$$

Находим из (9) требуемое значение емкости конденсатора фильтра, для получения заданного значения k_n :

$$C = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot (2\pi / 2 - 0,613)}{314 \cdot 0,2 \cdot 283^2} = 1 \text{ мФ.}$$

Действующее значение тока, протекающего через конденсатор согласно (10) и (11), соответственно, будет:

$$I_{RMS C} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot 220)^2}{2\pi} \cdot \left(0,613 - \frac{1}{2} \cdot \sin 1,23\right) + \left(1 - \frac{2 \cdot 0,613}{2\pi}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^3}{283}\right)^2} = 16,04 \text{ A};$$

$$I_{RMS C} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 0,613^3}{3} \cdot (1 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 220)^2 + \left(1 - \frac{2 \cdot 0,613}{2\pi}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^3}{283}\right)^2} = 16,5 \text{ A}.$$

Действующее значение фазного тока, потребляемого мостовой схемой выпрямителя в соответствии с (13) и (14) имеет значения:

$$I_{RMS \Phi} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \cdot 1 \cdot \left[(1 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot 220)^2 \cdot \left(0,613 - \frac{1}{2} \cdot \sin 1,23\right) + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot 220 \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^3}{283}\right) \cdot (1 - \cos 0,613) + 0,613 \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^3}{283}\right)^2 \right]} = 17,5 \text{ A};$$

$$I_{RMS \Phi} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot 220 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,613}{2\pi} \cdot 1 \cdot \left[\frac{2 \cdot 10^3}{\sqrt{2} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot 220 \cdot 283} + \left(\frac{0,613}{2}\right)^2 + \frac{0,613^2}{12} \right]} = 18,04 \text{ A}.$$

Результаты моделирования: $U_H = 284,3 \text{ В}$; $k_n = 0,197$; $I_{RMS C} = 16,11 \text{ А}$; $I_{RMS \Phi} = 17,64 \text{ А}$.

IV. Заключение

Сравнение результатов расчета U_H , $I_{RMS C}$, $I_{RMS \Phi}$, выполненных по предложенным формулам, и результатов, полученных при моделировании процессов в среде *MATLAB Simulink*, показывает, что в диапазоне изменения коэффициента пульсаций $k_n = 0,05 \div 0,2$ расхождение между ними не превышает 0,5 % и составляет не более 3 % в определении действующих значений тока конденсатора и фазного тока по (11), (14).

Полученные результаты позволяют рекомендовать предлагаемые расчетные выражения в практике проектирования емкостных фильтров мостовых m -пульсных выпрямителей AC/DC преобразователей.

Библиографический список

- [1] Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники. 4-е изд. Новосибирск: НГТУ, 2009. – 671 с.
- [2] Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
- [3] Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. Киев.: Высшая школа, 1983. – 431 с.
- [4] Чаки Ф., Герман И., Ипшич И., Карпати А., Магяр П. Силовая электроника: Примеры и расчеты / Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1982. – 384 с.
- [5] Попков О.З. Основы преобразовательной техники. 2-е изд. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 200 с.
- [6] Забродин Ю.С. Промышленная электроника. М.: Высшая школа, 1982. – 496 с.

V.V. Vaniaev**CALCULATION OF CAPACITIVE FILTER
OF BRIDGE RECTIFIER**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper is presented the calculation of the capacitive filter of the m-pulse bridge rectifier, which is an input link of the AC/DC converter. Simplified analytical expressions are obtained for determining the main parameters of the filter with sufficient accuracy for engineering calculations. An example of calculating a single-phase bridge rectifier is given.

Keyword: capacitive filter, the ratio of the ripple voltage, a rectifier bridge.

References

- [1] G.S. Zinoviev, *Osnovy silovoj elektroniki [Fundamentals of power electronics]*. Novosibirsk: NSTU Publishing house, 2009 (in Russian).
- [2] V.I. Meleshin, *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika [Transistor transformational technique]*. Moscow: Technosfera, 2006 (in Russian).
- [3] V.S. Rudenko, V.I. Senko and I.M. Chizhenko, *Preobrazovatel'naya tekhnika [Converter equipment]*. Kiev: Higher school, 1983 (in Russian).
- [4] F. Csaki, I. Hermann, I. Ipshits, A. Karpati and P. Magyar, *Power electronics: Problems manual*. Budapest, 1979 (in Russian).
- [5] O.Z. Popkov, *Osnovy preobrazovatel'noj tekhniki [Fundamentals of conversion technology]*. 2nd ed. Moscow: Publishing house of MPEI, 2007 (in Russian).
- [6] Yu.S. Zabrodin, *Promyshlennaya elektronika [Industrial electronics]*. Moscow: Higher school, 1982 (in Russian).