

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

В.В. Ваняев, К.Н. Иванычев, Я.А. Карпов, С.А. Коротков

### РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА DC – DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ АИР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены аналитические выражения для определения параметров и выбора основных пассивных элементов силовой цепи  $DC - DC$  преобразователя с последовательным автономным резонансным инвертором: конденсатора, дросселя и трансформатора. Дана методика расчета этих элементов.

*Ключевые слова:* преобразователь, автономный резонансный инвертор, конденсатор, дроссель, трансформатор, методика расчета.

В настоящее время достаточно широкое применение в структурах  $DC - DC$  и  $AC - DC$  преобразователей различной мощности получили транзисторные автономные резонансные инверторы (АИР), в частности, с последовательным резонансным контуром [1, 2]. Несмотря на присущее им несовершенство регулировочных свойств, они успешно применяются в системах зарядки накопительных конденсаторов и источниках вторичного электропитания с неизменным выходным напряжением.

Важнейшими достоинствами таких устройств являются простая силовая схема, особенно, в полумостовом варианте исполнения, в которых нет сглаживающего дросселя в цепи постоянного тока, практически отсутствуют динамические потери в транзисторах, простой алгоритм работы и высокая надежность.

Так, при выборе относительного значения частоты собственных колебаний резонансного контура последовательного АИР из условия

$$\omega_0^* = \omega_0 / \omega_p \geq 2, \quad (1)$$

где  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  - круговая частота собственных колебаний контура ( $C$ ,  $L$  - величины емкости и индуктивности резонансного контура);  $\omega_p$  - круговая рабочая частота АИР, внешняя характеристика  $DC - DC$  преобразователя с идеализированным последовательным АИР имеет два участка. На первом участке преобразователь работает в режиме источника напряжения равного  $U_n/2$ , а на втором – источника тока, среднее значение которого, согласно [3], определяется по формуле

$$I_{AV} = \frac{2U_n}{\pi\omega_0^*} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (2)$$

где  $U_n$  - напряжение питания АИР (значения напряжения и тока приведены к первичной обмотке трансформатора преобразователя). Такая особенность внешней характеристики  $DC - DC$  преобразователя при  $\omega_0^* \geq 2$  обеспечивает параметрическую защиту устройства при КЗ в цепи нагрузки и его высокую надежность, что для ряда применений играет решающую роль.

Несмотря на эти достоинства рассматриваемых устройств в известной литературе, материалы по режимам работы, инженерной методике расчета и выбору пассивных элементов силовой цепи  $DC - DC$  преобразователей в описанном ранее режиме работы весьма разрознены. Это, в частности, затрудняет работу студентов старших курсов и магистрантов при выполнении ими самостоятельных научно-исследовательских и расчетных работ, что вызывает необходимость восполнить этот пробел.

К основным пассивным элементам силовой цепи относятся трансформатор, дроссель и конденсатор последовательного резонансного контура.

### Конденсатор

Наибольшее среднее значение мощности, потребляемой полумостовым АИР в установившемся режиме, соответствующее границе жесткой части его внешней характеристики, согласно результатам анализа электромагнитных процессов [3], определяется по формуле

$$P_{\Pi} = 2f_p C U_{\Pi}^2, \quad (3)$$

где  $f_p = \omega_p / 2\pi$ .

Требуемое значение емкости конденсатора резонансного контура, обеспечивающее заданное значение мощности в нагрузке, в соответствии с (3) будет

$$C = \frac{P_{\Pi}}{2\eta_{\Pi} \cdot f_p \cdot U_{\Pi}^2}. \quad (4)$$

где  $P_{\Pi}$  - наибольшая расчетная мощность, передаваемая в нагрузку;  $\eta_{\Pi}$  - КПД преобразователя.

Амплитуда напряжения конденсатора определяется по формуле

$$U_{Cm} = \frac{1}{C\omega_0} I_m = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (5)$$

где  $I_m$  - амплитуда тока резонансного контура.

Наибольшее значение амплитуды тока  $I_m$ , согласно (2), будет

$$I_m = U_{\Pi} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (6)$$

Наибольшее значение амплитуды напряжения на конденсаторе, в соответствии с (5) и (6) равно

$$U_{Cm}^{\max} = U_{\Pi}. \quad (7)$$

### Дроссель

Наиболее напряженным для магнитопровода дросселя является режим на границе жесткой части внешней характеристики АИР где, как следует из анализа процессов, амплитуда тока дросселя максимальна и имеет значение, определяемое в соответствии с (6).

Амплитуда потокосцепления обмотки дросселя в этом режиме будет

$$\Psi_m = L I_m = U_{\Pi} \sqrt{LC}. \quad (8)$$

Амплитуда потокосцепления обмотки дросселя может быть определена также по формуле

$$\Psi_m = B_m \Pi_c w, \quad (9)$$

из которой находим число витков дросселя при выбранных значениях амплитуды индукции  $B_m$  и активной площади сечения  $\Pi_c$  его магнитопровода

$$w = \frac{\Psi_m}{B_m \Pi_c} = \frac{U_{\Pi}}{B_m \Pi_c} \sqrt{LC} = \frac{U_{\Pi}}{\omega_0 B_m \Pi_c} = \frac{U_{\Pi}}{2\pi \cdot \omega_0^* \cdot f_p \cdot B_m \Pi_c}. \quad (10)$$

Действующее значение тока обмотки связано с параметрами магнитопровода формулой

$$I_{RMS} = j \cdot q = \frac{j \cdot k_{ок} \Pi_{ок}}{w}, \quad (11)$$

где  $j$  - плотность тока;  $q$  - сечение провода обмотки;  $\Pi_{ок}$ ,  $k_{ок}$  - площадь окна магнитопровода и коэффициент его заполнения медью (рекомендуемое значение в зависимости от типа трансформатора составляет  $k_{ок} = 0,15 \div 0,4$  [4]).

Среднее за полупериод значение тока обмотки дросселя  $I_{AV}$  полумостового АИР можно определить по формуле

$$I_{AV} = \frac{2}{\pi \omega_0^*} I_m = \frac{2P_H}{\eta_{п} U_{п}}. \quad (12)$$

Из (12) получаем следующее расчетное выражение амплитуды тока дросселя:

$$I_m = \frac{\pi \omega_0^* P_H}{\eta_{п} U_{п}}. \quad (13)$$

Действующее значение тока дросселя с учетом (12) будет

$$I_{RMS} = \frac{I_m}{\sqrt{2 \omega_0^*}} = \frac{\pi \omega_0^* P_H}{\sqrt{2 \omega_0^*} \eta_{п} U_{п}} = \sqrt{\frac{\omega_0^*}{2}} \cdot \frac{\pi P_H}{\eta_{п} U_{п}}. \quad (14)$$

Решая совместно (10), (11) и (14), определяем габаритный показатель дросселя

$$\Pi_{ок} \Pi_{с} = \frac{P_H}{2 \sqrt{2 \omega_0^*} \cdot \eta_{п} \cdot f_p \cdot B_m \cdot j \cdot k_{ок}}. \quad (15)$$

Плотность тока в формуле (15) может быть определена по эмпирической формуле согласно [5]:

$$j = 1,5 + \frac{24}{\sqrt{P_{габ}}}, \quad (16)$$

где  $P_{габ}$  - габаритная мощность дросселя.

Габаритная мощность дросселя (трансформатора) определяется по формуле

$$P_{габ} = U_{RMS} \cdot I_{RMS}, \quad (17)$$

в которой наибольшее действующее значение напряжения  $U_{RMS}$  на обмотке дросселя в рассматриваемом режиме работы АИР с учетом (6) определяется по формуле

$$U_{RMS} = \frac{U_m}{\sqrt{2 \cdot \omega_0^*}} = \frac{U_{п}}{\sqrt{2 \cdot \omega_0^*}}. \quad (18)$$

Подставляя (14) и (18) в формулу (17), находим выражение для расчета габаритной мощности дросселя

$$P_{габ} = U_{RMS} \cdot I_{RMS} = \frac{\pi P_H}{2 \cdot \eta_{п}}. \quad (19)$$

Величину индуктивности дросселя резонансного контура рассчитывают по формуле

$$L = \frac{1}{C \omega_0^2}. \quad (20)$$

Для обеспечения рассчитанного значения индуктивности магнитопровод дросселя выполняют с немагнитным зазором, длину которого, при прочих известных параметрах, находят из выражения

$$l_3 = \mu_0 \frac{w^2 \Pi_{с}}{L}, \quad (21)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

### Трансформатор (двухобмоточный)

Напряжение первичной обмотки трансформатора  $u_1$  выражается следующим образом:

$$u_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} \approx \frac{w_1 \cdot \Pi_c \cdot dB}{dt}, \quad (22)$$

где  $\Psi_1$  и  $w_1$  - потокосцепление и число витков первичной обмотки, соответственно;  $B$  - индукция, в магнитопроводе;  $\Pi_c$  - активная площадь поперечного сечения сердечника трансформатора.

В рассматриваемом режиме работы  $DC - DC$  преобразователя напряжение на обмотках трансформатора имеет прямоугольную форму или близкую к ней форму, при которой приращение индукции на полупериоде работы АИР будет

$$\Delta B = \frac{U_{\Pi}}{4f_p w_1 \cdot \Pi_c}. \quad (23)$$

При симметричном перемагничивании магнитопровода справедливо равенство

$$dB = \Delta B = 2B_m, \quad (24)$$

где  $B_m$  - амплитудное значение индукции, которое, согласно, например, рекомендациям фирмы EPCOS, выбирают в пределах  $B_m = (0,5 \div 0,75) \cdot B_S$  ( $B_S$  - индукция насыщения материала магнитопровода).

Из уравнения (23) с учетом (24) находим число витков первичной обмотки

$$w_1 = \frac{U_{\Pi}}{8f_p B_m \Pi_c}. \quad (25)$$

Число витков  $w_2$  вторичной обмотки при заданном коэффициенте трансформации  $k_{21}$  равно  $w_2 = k_{21} w_1$ .

Действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора  $I_{RMS}$

при равных мощностях обмоток и плотности токов в них определяется по формуле, аналогичной (11):

$$I_{RMS} = \frac{j \cdot k_{OK} \Pi_{OK}}{2w_1}. \quad (26)$$

Из (25) и (26) находим габаритный параметр магнитопровода трансформатора

$$\Pi_c \Pi_{OK} = \frac{U_{\Pi} I_{RMS}}{4f_p B_m k_{OK} j} = \frac{P_{Габ}}{4f_p B_m k_{OK} j}, \quad (27)$$

где  $P_{Габ} = U_{\Pi} I_{RMS}$  - габаритная мощность трансформатора.

Габаритную мощность трансформатора, согласно выражению (17), определяем из формулы

$$P_{Габ} = U_{\Pi} I_{RMS} = \sqrt{\frac{\omega_0^*}{2}} \cdot \frac{\pi P_H}{\eta_T}, \quad (28)$$

$\eta_T$  - КПД трансформатора.

Величина КПД трансформатора в выражении (28) при мощностях до  $P_H \leq 300$  Вт может быть рассчитана по эмпирической формуле, полученной согласно рисунку [4]:

$$\eta_T = 0,99 - \frac{0,175}{f_p} - \frac{1 + \frac{9,95}{f_p^{1,3}}}{P_H}. \quad (29)$$

Значение плотности тока в обмотках трансформатора определяют по рассчитанной величине  $P_{Габ}$  в соответствии с формулой (16).

Для исключения динамических потерь в транзисторах АИР, обусловленных током намагничивания трансформатора, его первичную обмотку целесообразно шунтировать конденсатором  $C_{ш}$  небольшой емкости [3], величину которой выбирают из условия

$$C_{ш} \geq C_{гр}^* C, \quad (30)$$

где  $C_{гр}^*$  - максимальное относительное граничное значение емкости шунтирующего конденсатора, обеспечивающее бестоковую коммутацию транзисторов, принимая во внимание, что увеличение  $C_{ш}$  ведет к некоторому снижению выходной мощности преобразователя. Величину  $C_{гр}^*$  выбирают из графика, приведенного на рисунке, в зависимости от относительной индуктивности  $L_{\mu}^*$  контура намагничивания трансформатора.

Величину  $L_{\mu}^*$  определяют по формуле

$$L_{\mu}^* = \frac{\mu \mu_0 w_1^2 \Pi_c}{l_c L} = \frac{A w_1}{L}, \quad (31)$$

где  $\mu$ ,  $l_c$  - относительная магнитная проницаемость материала и средняя длина силовой линии магнитопровода трансформатора соответственно;  $A$  - индуктивность, приходящаяся на один виток первичной обмотки.

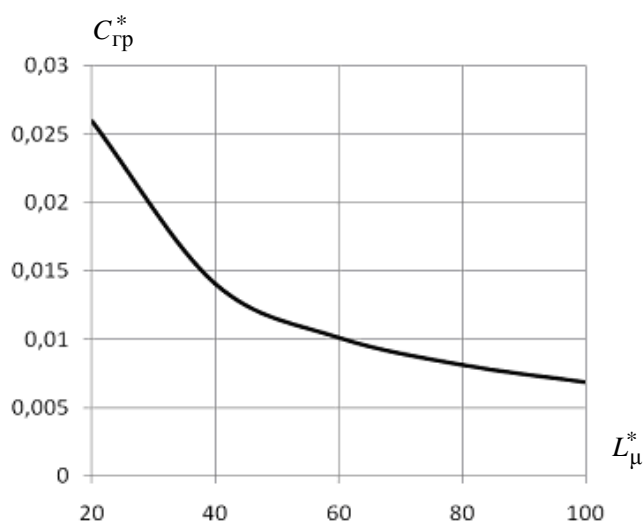


Рис. 1. Зависимость максимального относительного граничного значения емкости шунтирующего конденсатора от относительной величины индуктивности намагничивания контура

#### Методика расчета элементов:

- по заданному значению мощности  $P_{зад}$  нагрузки с коэффициентом запаса  $k_3 = 1,1 \div 1,3$  рассчитывают величину наибольшей расчетной мощности  $P_H$ , передаваемой в нагрузку  $P_H = k_3 P_{зад}$ ;
- по заданным значениям  $U_H$ ,  $f_p$ , задаваясь значениями  $\eta_H$  и  $\omega_0^*$  в соответствии с (4), определяют величину емкости  $C$  и индуктивности  $L$  резонансного контура;
- из (7) определяют максимальную амплитуду напряжения  $U_{Cm}^{max}$  на конденсаторе, по каталогам выбирают тип конденсатора;
- по (19) рассчитывают  $P_{габ}$  дросселя и далее в соответствии с (16) находят плотность тока его обмотки  $j$ ;

- в соответствии с (15), задаваясь значением  $B_m$ , определяют габаритный параметр  $\Pi_{\text{ок}}\Pi_{\text{с}}$ , по которому в каталогах находят требуемый разрезной магнитопровод;
- уточняют величины  $\Pi_{\text{ок}}$ ,  $\Pi_{\text{с}}$  и по формулам (10), (11), (21) определяют обмоточные данные дросселя  $w$ ,  $q$  и длину немагнитного зазора;
- по формулам (29), (28) рассчитывают  $P_{\text{габ}}$  трансформатора и затем, согласно (16), находят плотность тока его обмоток  $j$ ;
- по формуле (27), задаваясь значением  $B_m$ , определяют габаритный параметр  $\Pi_{\text{ок}}\Pi_{\text{с}}$ , по которому в каталогах находят требуемый магнитопровод;
- уточняют величины  $\Pi_{\text{ок}}$ ,  $\Pi_{\text{с}}$ , и по формулам (25), (11) и заданному коэффициенту трансформации  $k_{21}$  рассчитывают обмоточные данные трансформатора  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $q_1$ ,  $q_2$ ;
- по формулам (30) и (31) рассчитывают емкость  $C_{\text{ш}}$  шунтирующего конденсатора.

Приведенный материал и методика позволяют выполнить предварительный, эскизный расчет пассивных элементов преобразователя, а также дает ряд данных к расчету его полупроводниковых компонентов. При необходимости он может быть уточнен расчетами потерь в элементах и процессах теплообмена, согласно изложенному, например, в [2].

#### Библиографический список

1. Розанов, Ю.К. Силовая электроника / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
2. Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005.
3. Копелович, Е.А. Особенности электромагнитных процессов в высоковольтных источниках питания с последовательным резонансным инвертором / Е.А. Копелович, В.В. Ваняев, С.В. Хватов // Электротехника. 2011. №10. С. 13а–20.
4. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: справочник / Г.С. Найвельт, К.Б. Мазель, Ч. И. Хусаинов [и др.]; под ред. Г. С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1986.
5. Эраносян, С. А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями / С.А. Эраносян. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.

Дата поступления  
в редакцию 02.06.2015

V.V. Vaniaev, K. N. Ivanichev, Y. A. Karpov, S. A. Korotkov

#### CALCULATION OF THE ELEMENTS OF THE RESONANT CIRCUIT DC-DC CONVERTER WITH SERIAL RESONANT INVERTER

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev

**Purpose:** Lead design ratio and method that enables the calculation of all the electromagnetic components of the DC-DC converters which based on autonomous resonant inverter with a series resonant circuit.

**Design, methodology, approach:** All analytical expressions were tested using a mathematical model of the Converter in the program Mathlab.

**Findings:** In the article given the method of calculation of the basic electromagnetic elements of converter with self-contained resonant inverter: capacitor, inductor and transformer.

**Research limitations/implications:** In this method missing verification thermal calculations of elements.

**Originality/value:** The article is relevant and of interest to young professionals working in the field of power electronics.

*Key words:* converter, standalone resonant inverter, capacitor, inductor, transformer, method of calculation.