

УДК 621.314

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С АКТИВНО-ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

КАСМАМБЕТОВ Х. Т.
КГТУ им. И. Раззакова
E-mail: kusein@mail.ru

Рассматривается методика о предварительном допущении бесконечно большого значения емкости фильтра для определения аналитических зависимостей выходных характеристик выпрямителей с активно-емкостной нагрузкой

The technique about a preliminary assumption of infinitely great value of capacity of the filter for determination of analytical dependences of output characteristics of rectifiers with resistive-capacitive loading is considered

В электротехнических устройствах широко применяются выпрямители с емкостным сглаживающим фильтром на выходе, особенно в высоковольтных источниках питания, в которых затруднительно использование индуктивных элементов, так как это связано с преодолением сложных проблем создания надежных конструкций с высоковольтной изоляцией. Сравнительно малые массо-габаритные показатели выпрямителей с емкостными фильтрами обеспечили им большое распространение для питания нагрузок малой и средней мощности [1—5].

Определение точных выходных характеристик выпрямителей данного типа связано с большими трудностями аналитического плана. Для нахождения реакций в нелинейной электрической цепи приходится решать трансцендентные уравнения периодов, в которых искомые функции не выражаются в явном виде, а могут быть найдены лишь с помощью приближенных вычислений.

Нам известна методика проектирования выпрямителей [1, 2, 7] с учетом достаточно полной эквивалентной схемы замещения, включая резистивные и индуктивные потери в фазах питания. Методика основана на предварительном допущении о бесконечно большом значении емкости фильтра, что позволяет несколько упростить определение выходных характеристик и обеспечить приемлемую для практики точность расчета. Основной инструмент расчета — графические зависимости, построенные с помощью программы Electronic-Workbench и связывающие характеристики выпрямителя с безразмерными коэффициентами соотношений параметров схем.

Целесообразно попытаться вывести приближенные аналитические функции, которые в явном виде давали бы связь параметров схемы выпрямителя с выходными характеристиками и вместе с тем были бы достаточно простыми и точными для инженерной практики. Обоснованием такой возможности являются гладкость и монотонность исходных графических зависимостей [1, 2, 6], которые могут быть аппроксимированы аналитическими выражениями.

Рассмотрим работу p -пульсационного выпрямителя в режиме прерывистого тока, для которого можно представить эквивалентную расчетную схему (рис. 1), справедливую для состояния проводимости вентилей, и временные диаграммы (рис. 2), где $u_{ex} = U_m \cos(\omega t - \Theta)$ — входное переменное напряжение;

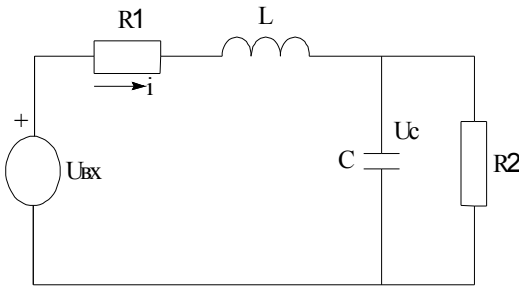


Рис. 1 Расчетная схема RLC

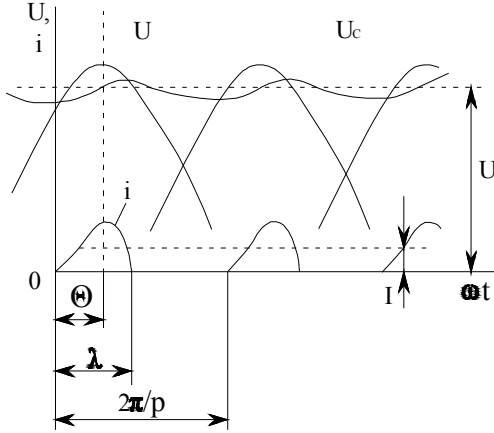
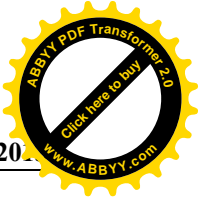
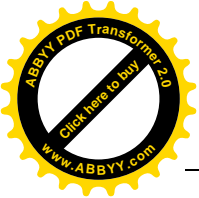


Рис. 2 Состояние проводимости вентилей

- R_1 — активное сопротивление фазы питания;
- L — индуктивность фазы питания;
- C — емкость фильтра;
- R_2 — сопротивление нагрузки выпрямителя;
- i — ток в фазе питания;
- u_c — напряжение на фильтровой емкости (выходное напряжение).

Условием существования режима прерывистого тока является наличие бестоковой паузы, которой происходит свободный разряд фильтра на нагрузку (длительность проводимости вентилей $\lambda \leq 2\pi/p$). Полагая, что емкостный фильтр обеспечивает малые пульсации, можно заменить нагрузку эквивалентным источником постоянного напряжения $U = IR_2$ и вывести выражение для нагрузочной (внешней) характеристики выпрямителя, заданной параметрически от углов отсечки Θ и проводимости вентилей λ :

$$\begin{cases} U = U_m \cos \Theta; \\ I = \frac{\rho U_m \cos \Theta}{2\pi R_1} \left\{ \frac{\varphi + \tan \Theta}{1 + \varphi^2} \left[\varphi^2 (1 - e^{-\lambda/\varphi}) + 1 \right] \right\} - \end{cases}$$



$$-\frac{1}{\sqrt{1+\varphi^2}} [\sin(\lambda - \arctan \varphi) + \tan \Theta \cos(\lambda - \arctan \varphi)] - \lambda \quad (1)$$

где $\varphi = \omega L/R_1$

Параметрические углы Θ и λ связаны с уравнением

$$\tan \Theta = \frac{(1 - e^{-\lambda/\varphi})\sqrt{1+\varphi^2} + e^{-\lambda/\varphi}/\sqrt{1+\varphi^2} + \cos(\lambda - \arctan \varphi)}{\varphi e^{-\lambda/\varphi}/\sqrt{1+\varphi^2} - \sin(\lambda - \arctan \varphi)} \quad (2)$$

Выражения (1), (2) громоздки, но дают возможность построить семейство нагрузочных характеристик при различных параметрах схемы выпрямителя.

Выведем аналитические зависимости нагрузочных характеристик в явном виде $U = f(I)$. Для этого оценим предельные соотношения углов Θ и λ отдельно при однотипных потерях в фазе питания: активных ($L=0$; $\varphi = 0$), реактивных ($R_1=0$; $\varphi = \infty$). Для случая чисто активных потерь, который чаще встречается в маломощных источниках питания и исследован в [3,4], справедливы соотношения:

$$\Theta_R \cong \sqrt[3]{3\pi R_1/\rho R_2}; \quad \lambda_R \cong 2\Theta_R \quad (3)$$

Для второго предельного случая углы находятся из (1), (2) вычислением соответствующих пределов:

$$\Theta_L \cong \sqrt[4]{3\pi\omega L/\rho R_2}; \quad \lambda_L \cong 3\Theta_L \quad (4)$$

Введем следующую предварительную оценку углов Θ , λ , охватывающую общий случай активно-индуктивных потерь в фазе питания и справедливую для предельных значений:

$$\Theta \cong \sqrt{\Theta_R^2 + \Theta_L^2} \quad (5)$$

$$\lambda \cong 2\Theta[1 + (\arctan \varphi)/\pi] \quad (6)$$

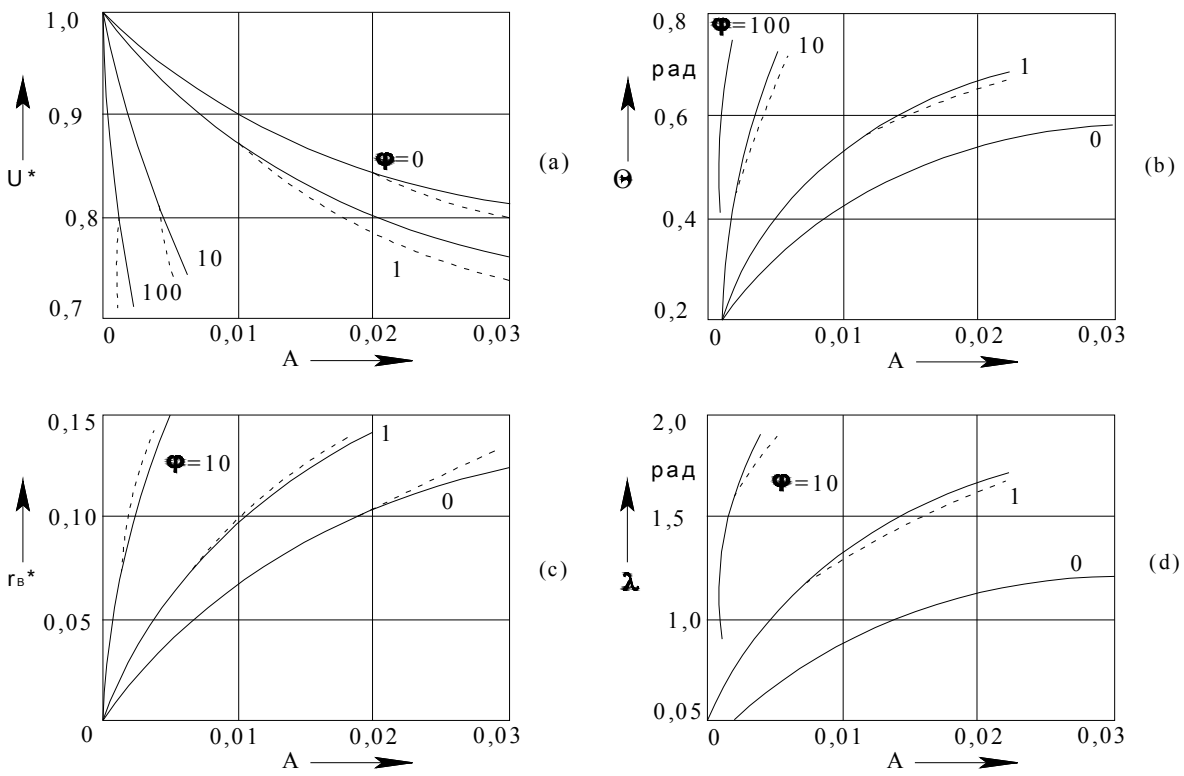
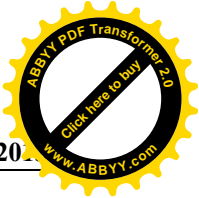
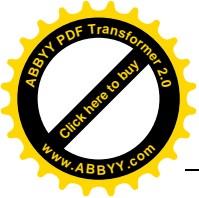


Рис.3а, b, с, d Графики нагрузочных характеристик и зависимости углов θ, λ (пунктиром даны точные решения исходных уравнений).

Погрешность выражения θ из (5) по сравнению с точным решением (1), (2) не превышает 10 % во всем диапазоне $\varphi = 0 \div \infty$ при $U \geq 0,8U_m$. Точность определения λ прямо зависит от точности оценки θ . (Для точных значений θ формула (6) дает погрешность аппроксимации λ по (2) меньше 5 %)

Наклон нагрузочных характеристик выпрямителя находится из динамического выходного сопротивления по постоянному току [3]

$$r_B = - dU/dI = - (dU/dR_2)/(dI/dR_2) \quad (7)$$

Если вычислить соответствующие производные из (1) и (5) и подставить в (7), получим

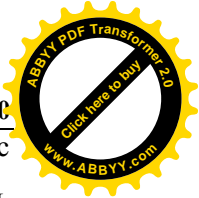
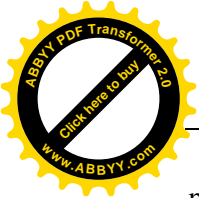
$$r_B \cong R_2 \theta^2 / 3 \quad (8)$$

или с учетом очевидного соотношения

$$U^* = U/U_m = \cos\theta \cong 1 - 0,5 \theta^2 \quad (9)$$

имеем в другой форме записи

$$r_B \cong 2R_2(1 - U^*)/3 \quad (10)$$



Выражение (10) с учетом (7) представляет собой дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными U, I , которое после интегрирования дает возможность получить искомые обобщенные нагрузочные характеристики выпрямителя в явном виде

$$U^* = 1/(1 + (I^*)^{2/3}). \quad (11),$$

где U^* -относительное значение выходного напряжения выпрямителя (по отношению к холостому ходу); I^* -то же выходного тока выпрямителя (по отношению к базисному току).

Для определенности необходимо выразить переменную I^* через параметры схемы замещения выпрямителя. Нужно конкретизировать точки аппроксимации нагрузочных характеристик с тем, чтобы семейство кривых, которое описывается единым выражением (11), имело малую погрешность для важного на практике условия $U^* \geq 0,8$. На основании (5), с учетом (3), (4), (9), можно записать уравнение для определения базисных величин $(\arccos U^*)^2 = (3\pi A)^{2/3} + (2\pi\varphi A)^{1/2}$, (12)

где $A = R_1/pR_2$ - безразмерный коэф-фициент.

Полагая $U^* = 0,8$, найдем базисные значения I_6^* из (11), A_6 из (12):

$$I_6^* = 0,125 ; A_6 = (\arccos 0,8)^2/(a + b\varphi), \quad (13)$$

где $a = 5$; $b = 4$ - коэффициенты, соответствующие предельным значениям параметров фазы питания ($\varphi=0; \varphi=\infty$). Окончательное выражение для переменной $I^* = I_6^* A/A_6$ после подстановки будет

$$I^* = A(5 + 4\varphi)/1,28. \quad (14)$$

Подставив (14) в (11), имеем искомое семейство нагрузочных характеристик для любых соотношений параметров схемы выпрямителя в аналитической форме. Погрешность выведенных зависимостей не превышает 5% по сравнению с точным решением системы уравнений (1), (2) в диапазоне $0,6 < U^* < 1,0$ (рис.3а)

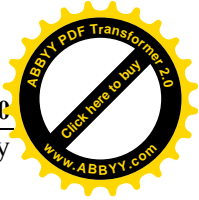
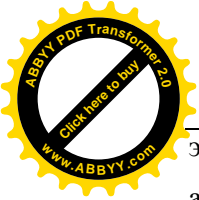
С учетом (9)-(11) удобно выразить через переменную I^* угол отсечки θ и относительно выходное сопротивление выпрямителя r_B^* :

$$\theta = \sqrt{2/(1 + (I^*)^{-2/3})} \quad (15)$$

$$r_B^* = r_B/R_2 = 2/3(1 + (I^*)^{-2/3}) \quad (16)$$

На рис.3 b,c,d построены зависимости угла отсечки θ , угла проводимости вентилей λ и относительного выходного сопротивления r_B^* . Необходимо отметить хорошее совпадение выведенных аналитических зависимостей: погрешность меньше 1% при $U^* \geq 0,6$.

Таким образом, в аналитической форме найденных зависимостей выходных характеристик выпрямителей с активно-емкостной нагрузкой, которые достаточно просты и точны для практического использования. Формулы (11),(14),(16) позволяют проектировать выпрямители, исходя из заданных выходных характеристик, определяя оптимальные соотношения параметров схемы замещения, что дает возможность формулировать требования к



элементам фазы питания –индуктивности рассеяния питающего трансформатора, суммарному активному сопротивлению обмоток трансформатора и вентилей схемы.

Литература

1. Мазель К. Б. Теория и расчет выпрямителя, раб. на емкость, с учетом индуктивности рассеяния тр.-М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957.
2. Макаров В. Л., Петров В. А., Попов С. Г. Стабилизированные выпрями-тели с емкостным фильтром.-Л.: Энергия, 1975.
3. Артамонов В. В. Маломощные выпрямители (основы теории и расчет). - М.:Связь, 1970.
4. Криштафович А. К., Трифонюк В. В., Основы промышленной электроники. Москва, «Высшая школа», 1979.
5. Чиженко И. М. Основы преобразовательной техники. М., 1974.
6. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Физматгиз, 1962.