

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»  
(ТУСУР)**

**Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга  
(РЭТЭМ)**

УТВЕРЖДАЮ

Декан РКФ

\_\_\_\_\_ Д.В. Озеркин

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2018 г.

**УПРАВЛЕНИЕ В СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Учебно-методическое пособие по курсовому проекту и самостоятельной работе

Зав. кафедрой РЭТЭМ

\_\_\_\_\_ В.И. Туев

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2018 г.

Аспирант

\_\_\_\_\_ А.Ю. Олисовец

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2018 г.

Томск 2018

Туев В.И., Олисовец А.Ю. Управление в светотехнических системах: учебно-методическое пособие по курсовому проекту и самостоятельной работе. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2018. – 15 с.

Учебное пособие предназначено для магистрантов направления подготовки 27.04.04 Управление в технических системах, профиль «Управление в светотехнических системах», изучающих дисциплину «Управление в светотехнических системах» и также может быть полезно студентам иных профилей и направлений подготовки.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	4
1 Теоретические сведения и расчетные соотношения .....	5
2 Расчетное задание .....	12
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	14

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ДК	Диэлектрические композиции
ДП	Диэлектрические подложки
ИП	Индустриальный партнёр
КД	Конструкторская документация
ККМ	Корректор коэффициента мощности
КМ	Композиционные материалы
КПД	Коэффициент полезного действия
Кристалл	Полупроводниковый светодиодный кристалл, излучающий свет
КСС	Кривая силы света
ЛОН	Лампы общего назначения
Люминофор	Материал, обладающий свойством фотолюминесценции
МКР	Метод конечных разностей
МКЭ	Метод конечных элементов
НТИ	Научно-техническая информация
НТО	Научно-технический отчёт
ПМ	Программы и методики
ПО	Программное обеспечение
ПНИЭР	Прикладные научные исследования и экспериментальные разработки
СД	Светодиод
СИЭ	Светодиодный излучающий элемент
ТД	Технологическая документация
ТЗ	Техническое задание
ТЗС	Термозвуковая сварка
ТО	Технологическая операция
ТП	Технологический процесс
УЗС	Ультразвуковая сварка
ЭМП	Электромагнитные помехи

## 1 Теоретические сведения и расчетные соотношения

Светодиодные лампы получили широкое распространение благодаря преимуществам, таким как высокое значение световой отдачи, экологическая безопасность и более длительный срок службы. Светодиодные лампы постепенно вытесняют с рынка искусственного освещения традиционные источники света – лампы накаливания и люминесцентные источники света.

Как правило, в конструкции светодиодной лампы предусмотрен выпрямитель и стабилизатор, обеспечивающий неизменное значение тока, протекающего через светодиоды, которые на схеме электрической структурной (рис. 1) обозначены как «Нагрузка».



Рисунок 1 – Схема электрическая структурная источника питания светодиодной лампы

В конструкции источника питания светодиодных источников света, как правило, используется выпрямитель с корректором коэффициента мощности (ККМ).

Активные корректоры обеспечивают более высокое значение коэффициента мощности в сравнении с пассивными, однако данные устройства имеют высокий уровень электромагнитных помех в радиочастотном диапазоне и требуют применения специальных мер для выполнения требований по электромагнитной совместимости [1-3]. Пассивные корректоры избавлены от этого недостатка и находят применение в устройствах питания светодиодных светотехнических устройств [4].

В настоящей работе рассматривается полупроводниковый преобразователь напряжения с пассивным корректором коэффициента мощности, который достаточно хорошо изучен [4-10], однако вопросы нелинейного анализа в части эмиссии гармоник решены не окончательно.

Пассивные ККМ, как правило [4–10], строятся в соответствии с типовой схемой, приведенной на рис. 2.

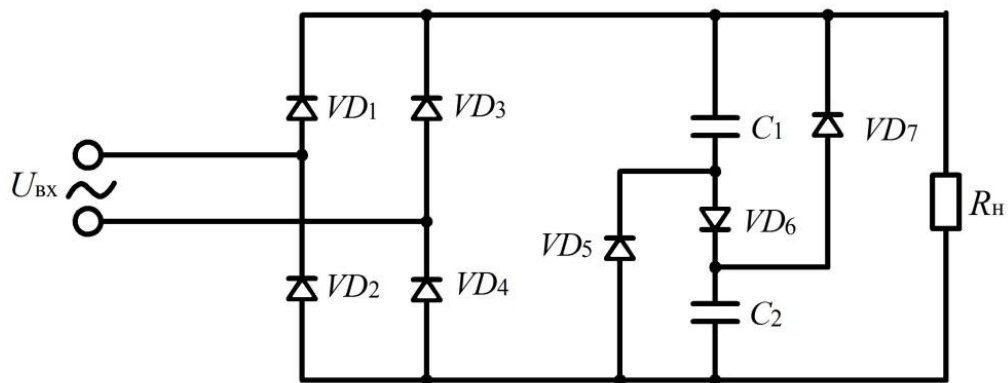


Рисунок 2 – Типовая схема выпрямителя с пассивным ККМ

Устройство содержит двухполупериодный выпрямитель на диодах VD1–VD4, два сглаживающих конденсатора C1 и C2 и диоды VD5–VD7. Нагрузкой являются два последовательно включенных светоизлучающих диода КИПД152А9 АДКБ.432220.418 ТУ общим напряжением 3,6 В при стабилизированном токе 0,01 А. Для целей последующего анализа используется эквивалентное сопротивление нагрузки Rн значением 360 Ом.

На диоды VD1–VD4 подается переменное входное напряжение:

$$U_{\text{вх}}(t) = U_m \cdot \sin(\omega t), \quad (1)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение входного напряжения;

$\omega = 2\pi f$  – круговая частота питающей сети.

Для последующего расчета приняты амплитудное значение напряжения  $U_m$ , равное 12 В, значение частоты питающего напряжения  $f = 50$  Гц. Конденсаторы C1 и C2 имеют одинаковые значения емкости, равные 47 мкФ.

Для последующего анализа формы тока и напряжения на элементах цепи применен метод кусочно-линейной аппроксимации вольт-амперных характеристик диодов VD1–VD7 [11, рис. 21.36] с учетом следующих ограничений и допущений:

Значения сопротивлений диодов при протекании прямого тока приняты одинаковыми и равными  $r = 10$  Ом.

Значение сопротивления питающей сети (источник напряжения  $U_{\text{вх}}$ ) принято равным нулю.

Процессы, протекающие в цепи (рис. 2) можно разделить на повторяющиеся группы из четырех временных интервалов. Привязка границ интервалов к форме напряжения на нагрузке в установившемся режиме функционирования выпрямителя с ККМ иллюстрируется рис. 3: первый – от  $t_1$  до  $t_2$ , второй – от  $t_2$  до  $t_3$  и третий – от  $t_3$  до  $t_4$ , четвертый от  $t_4$  до  $t_1 + T/2$ , где  $T = 1/f$  – период переменного напряжения питающей электрической сети.

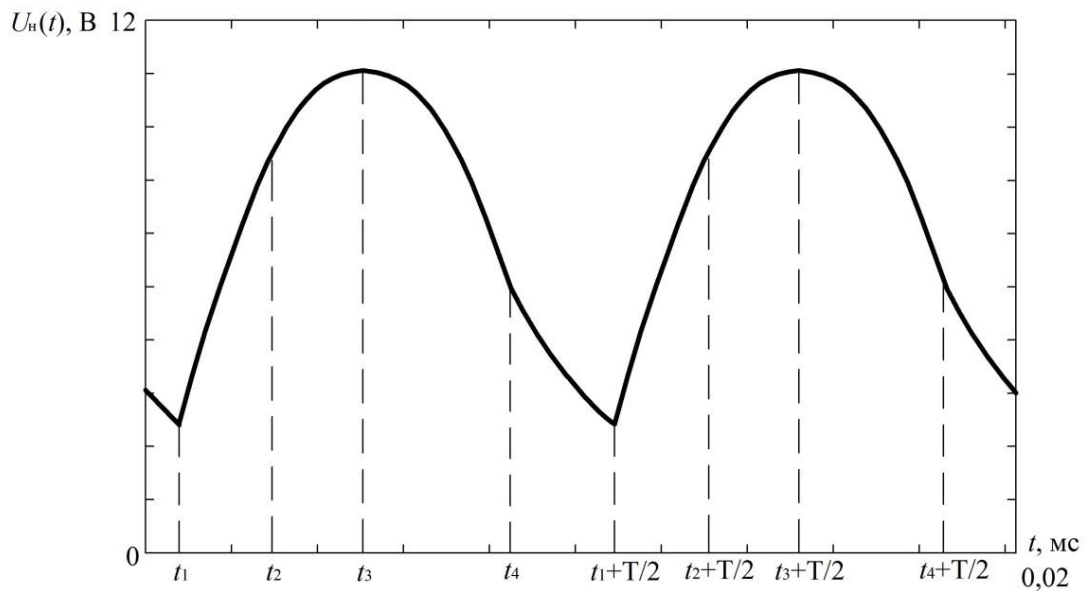


Рисунок 3 – Форма напряжения на нагрузке

На первом интервале от  $t_1$  до  $t_2$  (рис. 3) диоды VD5, VD6. и VD7 закрыты. Начинается первый интервал с момента превышения мгновенного значения модуля входного переменного напряжения остаточного потенциала на конденсаторах C1 и C2 , а заканчивается – моментом превышения мгновенного значения модуля входного напряжения суммы остаточных напряжений на конденсаторах C1 и C2. Эквивалентная схема цепи, поясняющая процессы в выпрямителе с пассивным ККМ для первого интервала, приведена на рис. 4.

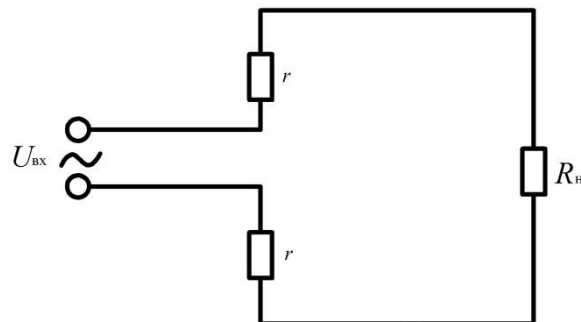


Рисунок 4 – Эквивалентная схема цепи для первого интервала от  $t_1$  до  $t_2$

Ток, потребляемый от электрической сети на первом интервале  $i_1(t)$ , определяется током, протекающим через нагрузку  $i_n$ . Конденсаторы C1 и C2 имеют остаточное напряжение, значения которых на первом интервале не изменяются.

Ток, протекающий через нагрузку, находится операторным методом анализа и рассчитывается по формулам:

$$i_n t = \frac{U_{m1}}{R_n} \cdot \sin \omega t , t = t_1, \dots, t_2 , \quad (2)$$

$$U_{m1} = U_m K_1, \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{R_H}{R_H + 2r}. \quad (4)$$

На втором интервале от  $t_2$  до  $t_3$  диоды VD5 и VD7 закрыты, конденсаторы C1 и C2 включены последовательно через прямосмещенный диод VD6 и заряжаются каждый до половины мгновенного значения входного напряжения. Момент времени  $t_3$  соответствует максимальному значению мгновенного напряжения на нагрузке [4]. Эквивалентная схема цепи, поясняющая процессы в выпрямителе с пассивным ККМ для второго интервала приведена на рис. 5. Эквивалентная емкость  $C_{\text{посл}}$  последовательно включенных конденсаторов C1 и C2 определяется соотношением:

$$C_{\text{посл}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (5)$$

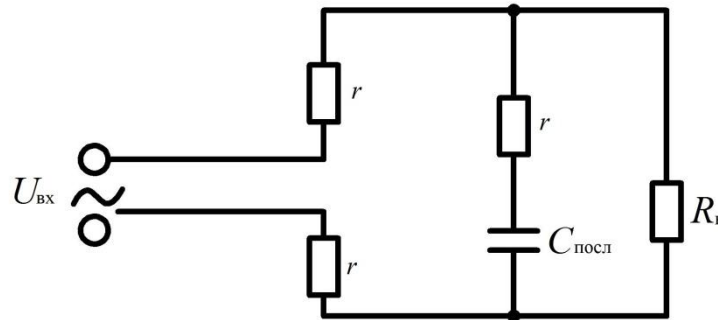


Рисунок 5 – Эквивалентная схема цепи для второго интервала от  $t_2$  до  $t_3$   
Одновременно протекают два процесса:

ток питающей сети протекает через нагрузку, при этом форма протекающего тока повторяет форму напряжения;

ток протекает через конденсатор  $C_{\text{посл}}$ , заряжая его.

Таким образом, модуль значения тока, потребляемого от электрической сети на втором интервале  $i_2(t)$ , равен сумме токов, протекающих через нагрузку  $i_H$  и эквивалентную емкость  $C_{\text{посл}}$  последовательно включенных конденсаторов  $i_{C_{\text{посл}}}$ :

$$i_2 t = i_H t + i_{C_{\text{посл}}} t. \quad (6)$$

Мгновенное значение напряжения на нагрузке  $U_H t$  определяется модулем мгновенного значения входного напряжения [3]:

$$U_H t = U_{m2} \cdot \sin \omega t + \varphi_1, \quad t = t_2, \dots, t_3. \quad (7)$$

Численные значения амплитуды  $U_{m2}$ , фазы  $\varphi_1$  и тока, протекающего через нагрузку, находятся операторным методом анализа и рассчитываются по формулам:

$$i_H t = \frac{U_{m2}}{R_H} \cdot \sin \omega t + \varphi_1, \quad t = t_2, \dots, t_3, \quad (8)$$



$$U_{m2} = U_m W_2(p) , \quad (9)$$

$$\varphi_1 = \text{Arg } W_2 p , \quad (10)$$

$$W_2 p = \frac{Y}{Y+2r} , \quad (11)$$

$$Y = \frac{R_H \cdot Z}{R_H + Z} , \quad (12)$$

$$Z = r + \frac{1}{p \cdot C_{\text{посл}}} . \quad (13)$$

В момент времени, непосредственно предшествующий  $t_2$  конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  имеют остаточный заряд, поэтому изменение напряжения на них на втором интервале определяется классическим методом анализа переходных процессов [8] в виде суммы установившейся  $U_{C_{\text{посл}У}}$  и свободной  $U_{C_{\text{посл}СВ}}$  составляющих:

$$U_{C_{\text{посл}}} t = U_{C_{\text{посл}У}} t + U_{C_{\text{посл}СВ}} t . \quad (14)$$

Установившееся напряжение на конденсаторе равно:

$$U_{C_{\text{посл}У}}(t) = U_{m2} \cdot \frac{1}{1 + \omega \tau_1^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2}) , \quad (15)$$

где  $\varphi_2 = -\arctg(\omega \tau_1)$  – угол сдвига фаз между установившимся током в цепи и приложенным синусоидальным напряжением;

$$\tau_1 = rC_{\text{посл}} - \text{постоянная времени.}$$

Свободная составляющая напряжения на конденсаторе определяется по формуле:

$$U_{C_{\text{посл}СВ}}(t) = A_1 e^{-t/\tau_2} , \quad (16)$$

где  $A_1$  – постоянная интегрирования;

$\tau_2$  – постоянная времени, значение которой определяется по формуле

$$\tau_2 = C_{\text{посл}} \cdot r + \frac{2r \cdot R_H}{2r + R_H} .$$

Подставляя (15) и (16) в (14) получим формулу для расчета переходного напряжения на конденсаторе:

$$U_{C_{\text{посл}}} t = \frac{U_{m2}}{1 + \omega \tau_1^2} \sin \omega t + \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} + A_1 e^{-\frac{t}{\tau_2}} . \quad (17)$$

Полагая, что значение напряжения на конденсаторе перед началом переходного процесса равно напряжению в начале переходного процесса  $U_{C_{\text{посл}}} -t_2 = U_{C_{\text{посл}}} t_2$ , значение постоянной интегрирования определим по формуле:

$$A_1 = U_{C_{\text{посл}}} t_2 - \frac{U_{m2}}{1 + \omega \tau_1^2} \cdot \sin \omega t_2 + \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} . \quad (18)$$

Временную зависимость напряжения на конденсаторе  $C_{\text{посл}}$  на втором интервале можно записать в виде:

$$U_{C_{\text{посл}}} t = \frac{U_{m2}}{1 + \omega \tau_1^2} \cdot \sin \omega t + \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} + U_{C_{\text{посл}}} t_2 - \frac{U_{m2}}{1 + \omega \tau_1^2} \cdot \sin \omega t_2 + \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}, t = t_2, \dots, t_3. \quad (19)$$

Временная зависимость тока через последовательно включенные конденсаторы С1 и С2 определяется выражением:

$$i_{C_{\text{посл}}} t = C_{\text{посл}} \frac{dU_{C_{\text{посл}}} t}{dt}, t = t_2, \dots, t_3. \quad (20)$$

После выполнения вычислений по формулам (7)-(20) и подстановки  $i_{C_{\text{посл}}}$  в (6) определяется значение потребляемого тока на втором интервале.

На третьем интервале от  $t_3$  до  $t_4$  (рис. 3) диоды VD5, VD6. и VD7 закрыты. Момент времени  $t_4$  определяется равенством мгновенного значения модуля входного напряжения и потенциалов конденсаторов С1 и С2, накопленных к моменту времени  $t_3$ . В этот промежуток времени нагрузка находится под действием входного напряжения. Процессы, протекающие в исследуемом устройстве аналогичны первому интервалу. Эквивалентная схема цепи, поясняющая процессы в выпрямителе с пассивным ККМ для третьего интервала аналогична приведенной на рис. 4, а потребляемое значение тока рассчитывается по формулам (2)-(4) для  $t = t_3, \dots, t_4$

На четвертом интервале от  $t_4$  до  $t_1+T/2$  диод VD6 закрыт. Конденсаторы С1 и С2 через прямосмещенные диоды VD5. и VD7 включены параллельно и разряжаются через нагрузку. Напряжение на нагрузке экспоненциально уменьшается относительно начального значения в момент времени  $t_4$ :

$$U_H t = U_{C_{\text{пар}}} t_4 e^{-t/\tau_3}, t = t_4, \dots, t_1 + T/2, \quad (21)$$

$$\tau_3 = C_{\text{пар}} \frac{r}{2} + R_H ,$$

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2.$$

Потребляемый от сети ток на данном интервале времени отсутствует.

Для построения временной зависимости напряжений и токов на четвертом интервале, необходимо найти численное значение  $t_1$  и  $t_4$ .

Численное значение  $t_4$  определяется равенством мгновенного напряжения  $U_2 t$  и  $U_{m2}/2$ .

Момент времени  $t_1$  находится при решении трансцендентного уравнения [8]:

$$U_{m2} \cdot \sin \omega t_1 = U_{m2} \cdot \sin \omega t_4 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}}. \quad (22)$$

Зная численные значения моментов времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ , и  $t_4$  можно построить форму напряжения на нагрузке (рис. 3) и форму потребляемого тока (рис. 6).

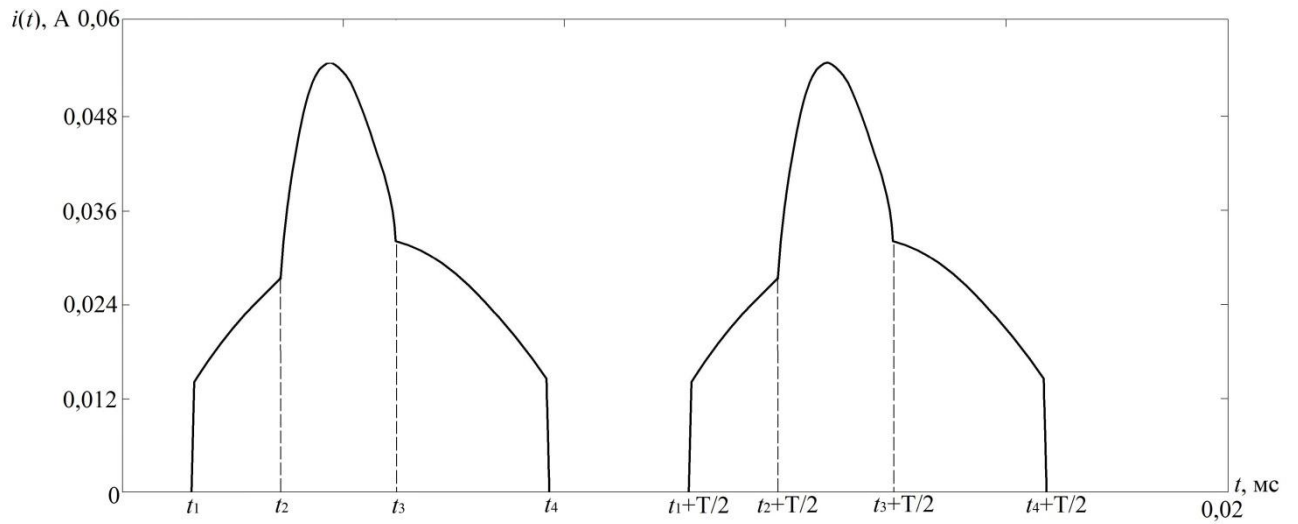


Рисунок 6 – Форма потребляемого тока

Для анализа гармонического состава тока необходимо функцию, описывающую форму потребляемого тока (рис.6) разложить в ряд Фурье, согласно формуле:

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cdot \sin(k\omega t), \quad (23)$$

где  $a_k, b_k$  – коэффициенты разложения в ряд Фурье [8].

## 2 Расчетное задание

Для схемы, изображенной на рис. 2, осуществить расчет параметров, по вариантам заданий, приведенным в таблице 1.

Таблица 1. Данные по вариантам заданий

Номер варианта	Тип VD1-VD7	Значение C1, C2	Значение Rн, Ом	Что подлежит расчету
1	Выбрать самостоятельно	47 мкф	360	Временная зависимость напряжения на нагрузке
2	Выбрать самостоятельно	470 мкф	240	Временная зависимость потребляемого тока
3	Выбрать самостоятельно	470 мкф	120	Значение коэффициента мощности
4	Выбрать самостоятельно	470 мкф	90	Эмиссия гармоник с порядковыми номерами 1...49
5	Выбрать самостоятельно	4700 мкф	51	Коэффициент полезного действия

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Afonin, K.N., Olisovets, A.Y., Ryapolova, Y.V., Soldatkin, V.S., Starosek, D.G., Tuev, V.I., Hristyukov, V.G. LED lamp design optimizing on minimum non-uniformity of light intensity distribution in space // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2016 - Proceedings Volume 2, 4 January 2017, Статья №7806435, Pages 153-155.
2. Карзов Б. Н., Кастров М. Ю. Схемы коррекции коэффициента мощности с учетом фильтрации помех сетевого напряжения // Практическая силовая электроника. – 2009. – № 2. – С. 2-7.
3. Чаплыгин, Е. Е. Спектральное моделирование корректоров коэффициента мощности / Е. Е. Чаплыгин, Хоанг Ан Нгуен // Практическая силовая электроника. 2004. - № 15. - С. 23-28.
4. Чаплыгин, Е. Е. Спектральные модели корректоров коэффициента мощности с ШИМ / Е. Е. Чаплыгин // Практическая силовая электроника. -2003. -№ И.-С. 26-31.
5. Махлин А. Особенности проектирования блока питания для светодиодных ламп // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 1. – С. 30-33.
6. Твердов И. Пассивные корректоры коэффициента мощности для однофазных и трехфазных модулей питания // Силовая электроника. – 2009. – № 4. – С. 8-11.
7. Григорьев, В. Коррекция коэффициента мощности во вторичных источниках электропитания/ В. Григорьев, Е. Дуплякин // Электронные компоненты. – 2000. – №2. – С. 66-68.
8. Marco A. Dalla Costa, Ricardo N. do Prado, Alexandre Campos. An Analysis About Valley Fill Filters Applied to Electronic Ballasts. Industrial Electronics Society, (2003).
9. John C. W. Lam, Shangzhi Pan, Praveen K. Jain. A Single-Switch Valley-Fill Power-Factor-Corrected Electronic Ballast for Compact Fluorescent Lightings With Improved Lamp Current Crest Factor. IEEE Transactions on Industrial Electronics ,Vol. 61, (2014).
10. Alysson R., Seidel Marco A., Dalla Costa., Alexandre Campos., Ricardo N. do Prado. An analysis about Valley Filters applied to electronic ballast // Proceedings of the 29th annual conference of the IEEE industrial electronics society. – Vol.3, P. 509-514, IECON. – 2003.
11. John Chi Wo Lam, Praveen K. Jain. A Modified Valley Fill Electronic Ballast

Having a Current Source Resonant Inverter With Improved Line-Current Total Harmonic Distortion (THD), High Power Factor, and Low Lamp Crest Factor. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 3, (2008)

12. Демирчян К.С., Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники // Спб., Изд-во Питер, 4-е издание, 2003. –Том 2. – 570 с.