

УДК 628.94

ВЧ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ БАЛЛАСТОВ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Тихомиров Ю.П.

Закрытое акционерное общество «Петушинский металлический завод», г.Москва,
Российская Федерация

Аннотация. В этой статье дается краткий обзор существующих технических решений по ВЧ преобразователям, используемых в ЭПРА люминесцентных ламп, на физической модели проанализированы токи и напряжения в цепи люминесцентной лампы при прямоугольном напряжении питания этой цепи в режиме резонансного запуска, режиме перестройки частоты и в рабочем режиме

Ключевые слова: люминесцентная лампа; балласт; резонанс; полумост.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Введение.

Основные преимущества электронных балластов перед электромагнитными – более высокая светоотдача при такой же мощности, минимальное или отсутствующее мерцание на двойной частоте сетевого питания, высокий коэффициент мощности, - достигаются за счет повышения частоты переменного тока питания ламп с частоты 50 Гц до 20-50кГц.[1]

Преобразование электрической энергии низкой частоты (50Гц) в энергию высокой частоты происходит в 2 этапа: сначала её преобразуют в энергию постоянного тока, обеспечивая при этом коррекцию коэффициента мощности [2], а затем энергию постоянного тока преобразуют в высокочастотную энергию питания люминесцентных ламп.

Схемотехника, принципы работы и согласование схем включения ламп в светильнике с выходом корректоров коэффициента мощности различных типов были рассмотрены в [3].

В настоящей статье сделан обзор схемотехнических решений основных типов преобразователей постоянного тока в переменный ток ВЧ, используемых в современных электронных балластах. Предложена физическая модель, на которой наглядно показаны процессы формирования токов и напряжений в цепи люминесцентной лампы при прямоугольном напряжении питания этой цепи в режиме резонансного запуска, режиме перестройки частоты и в рабочем режиме.

1. Преобразование постоянного тока в переменный с помощью электронных коммутирующих устройств.

Для того, чтобы преобразовать постоянный ток в переменный, необходимо переключать направление тока в нагрузке с заданной частотой. Величина напряжения на нагрузке при переключениях, как правило, не меняется - меняется только его полярность.

На рис.1 (а,в,с) приведены распространенные схемы коммутирующих устройств, позволяющих решить эту задачу.

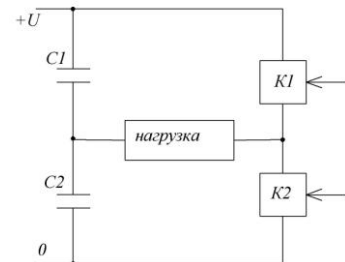
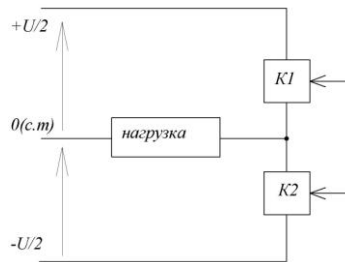
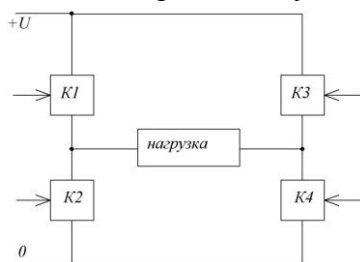


Рис. 1а Полный мост

Рис.1б Полумост, источник питания двуполярный

Рис. 1в Полумост для ВЧ, питание однополярное.

Мостовая схема, приведенная на рис.1а, образована четырьмя ключами $K1...K4$, включенными в плечи моста, в диагональ которого включена нагрузка. Ключи $K1, K4$ и $K2, K3$ открываются парами, поочередно. При этом, к нагрузке всегда прикладывается полное напряжение источника питания U , а его полярность может меняться с частотой переключения пар ключей, от нуля до десятков килогерц.

Полумостовая схема (рис.1б) содержит только 2 ключа ($K1$ и $K2$), переключающие один конец нагрузки поочередно на плюс или на минус источника питания с напряжением U , имеющим среднюю точку, к которой подключен второй конец нагрузки. Такой преобразователь может работать в том же диапазоне частот, что и по рис.1а, но переменное напряжение на его выходе равно $U/2$ (половине напряжения источника питания).

Подобные схемы довольно широко применяются там, где требуется работа с низкой (от нуля до сотен герц) частотой, например, при построении источников питания металлогалогенных ламп. Для люминесцентных ламп, работающих на частотах в несколько десятков килогерц, применяют более простую и дешевую в реализации схему, приведенную на рис.1в. В ней один конец нагрузки подключают к полумосту, а второй – через конденсатор к одному из полюсов источника питания, или через одинаковые конденсаторы к обоим полюсам источника. Преимущество последнего варианта в том, что после включения напряжение на средней точке делителя, образованного конденсаторами $C1, C2$ равно половине напряжения питания, что соответствует установившемуся режиму работы.

2. Цепь люминесцентной лампы в качестве нагрузки ВЧ преобразователя.

Поскольку напряжение на выходе электронного преобразователя меняет знак скачком, его нагрузка не может быть емкостной: она должна быть или активной, или индуктивной. Вольтамперная характеристика люминесцентной лампы нелинейна, что также требует применения балласта, включенного последовательно с лампой. Поэтому в цепи лампы всегда установлен дроссель L , который в рабочем режиме выполняет функцию индуктивного балласта.

Последовательная цепь, состоящая из люминесцентной лампы и дросселя, обеспечивает стабильный рабочий режим при ВЧ питании лампы.

Чтобы зажечь лампу, на нее потребуется подать напряжение, в несколько раз превышающее рабочее. Это напряжение легче всего получить за счет раскачки последовательного колебательного контура, образованного дросселем L и пусковым (резонансным) конденсатором C , подключенным параллельно лампе.

Принцип раскачки контура наглядно поясняется диаграммами, приведенными на рис.3.

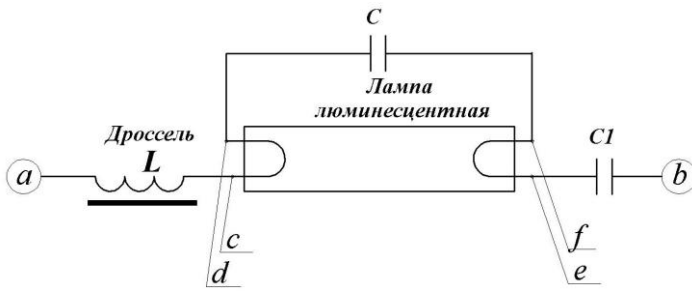


Рис.2 Схема цепи люминесцентной лампы

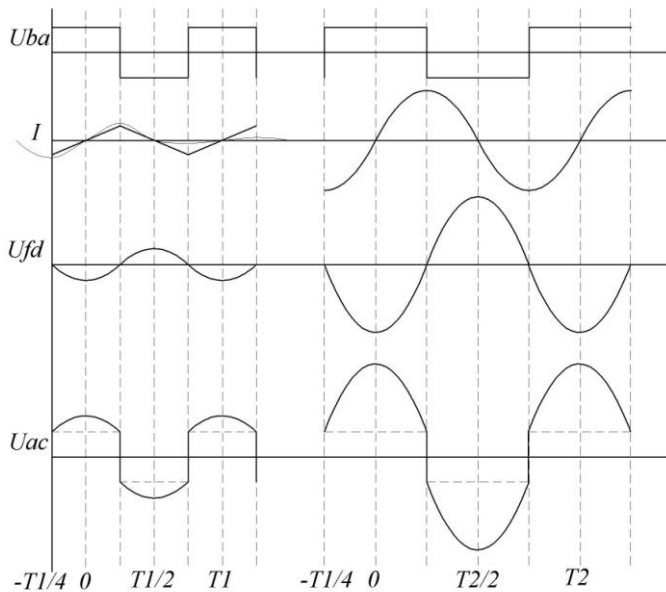


Рис.3 Диаграммы напряжений и токов цепи лампы

значения, вследствие чего напряжение на конденсаторе оказывается включенным в противофазе с подаваемым прямоугольным напряжением и складывается с ним, увеличивая напряжение на дросселе (рис.3, U_{ac}).

$$2. \quad U_{ac} = U_{ab} + U_{bc}$$

Форма кривой, описывающей напряжение на C (U_{bc}) как функцию времени, близка к синусоидальной, поскольку в прямоугольном напряжении питания уровень 3-й гармоники составляет 1/3 от уровня первой, в токе дросселя ее уровень составляет только 1/9, а в напряжении на C - лишь 1/27.

Пока напряжение на C невелико по сравнению с входным напряжением цепи, его влиянием можно пренебречь. Но, при снижении частоты по направлению к резонансу, синусоидальная добавка к прямоугольному напряжению на дросселе становится заметной, ее влияние начинает увеличиваться, и напряжение на дросселе перестанет быть прямоугольным (рис.3, кривая U_{ac}). Форма кривой тока тоже изменится, и на интервале $(-T/4, T/4)$ будет выражаться формулой

$$3. \quad I(t) = \int \frac{U_{ab} + A \sin \omega t}{L} dt = \frac{U_{ab}}{L} t - \frac{A}{L} \cos \omega t.$$

Где A - амплитуда тока цепи;

$$\omega - \text{круговая частота питания. } \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}; \quad T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

На частоте, значительно превышающей частоту резонанса контура, все поданное прямоугольное напряжение приложено к дросселю L . При этом, ток дросселя (рис.3, кривая $I(t)$) линейно нарастает на интервале от $-T/4$ до $T/4$ и линейно падает на интервале от $T/4$ до $3T/4$ (пила).

В общем случае, скорость нарастания прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна индуктивности дросселя L , тогда ток определяется выражением

$$1 \quad I(t) = \int \frac{U_{ca}}{L} dt$$

Где $I(t)$ - мгновенное значение тока дросселя в момент t ;

U_{ac} - напряжение на дросселе (между точками a и c по рис.2)

Пилообразный ток дросселя перезаряжает емкость, образованную соединенными последовательно конденсаторами C и $C1$. Обычно $C \ll C1$, и влиянием $C1$ при пуске лампы можно пренебречь. При этом, напряжение на C (рис.3, U_{fd}) нарастает при положительных значениях тока (на интервале от $-T/4$ до $T/4$) и падает при его отрицательных

Это означает, что к пилообразному току цепи будет сделана добавка, увеличивающая амплитуду тока и сглаживающая форму кривой $I(t)$, уменьшая уровень высших гармоник в токе цепи. По мере снижения частоты питания и приближения ее к резонансу, форма тока становится практически синусоидальной, растет величина тока и напряжение на конденсаторе C . (диаграммы на правой стороне рис.3).

Напряжение на резонансном конденсаторе (и на лампе) до ее зажигания, с учетом активных потерь в контуре, описывается формулой

$$4. \quad u_c = \frac{1}{2} \frac{u_{num}}{\sqrt{(\omega L - \frac{1}{\omega C})^2 + r^2}} \cdot \frac{1}{\omega C}$$

Где u_c - действующее значение напряжения на резонансном конденсаторе;

u_{num} - напряжение питания выходного полумоста;

L - индуктивность дросселя;

C - емкость резонансного конденсатора;

ω - круговая частота питания лампы;

r - суммарное активное сопротивление цепи дросселя.

При дальнейшем приближении частоты питания к частоте резонанса напряжение на резонансном конденсаторе C достигает напряжения пробоя межэлектродного промежутка лампы и лампа запускается. На частотах питания выше 1кГц у лампы нет падающих участков вольтамперной характеристики [4], и цепь горячей лампы, питающейся ВЧ током, может быть

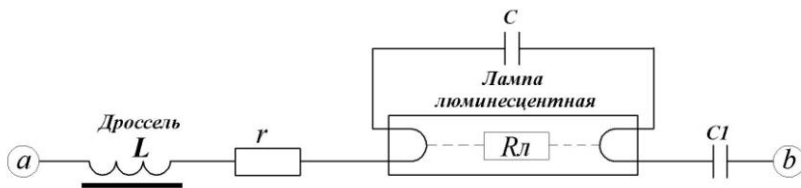


Рис.4 Схема цепи лампы в рабочем режиме

представлена схемой, приведенной на рис.4. В схеме сохранены обозначения элементов, принятые на рис.2, а горячая люминесцентная лампа представлена как резистор $Rл$, на котором рассеивается мощность, эквивалентная мощности лампы в рабочем режиме.

Цепь горячей лампы также, как и при пуске, является последовательным колебательным контуром (рабочим), в котором вместо C , подключенного параллельно лампе, установлен много больший конденсатор $C1$. Резонансная частота рабочего контура много ниже резонансной частоты пускового, а затухание – много выше, оно определяется энергией, отдаваемой в лампу. В рабочем режиме ток через лампу (R) многократно превышает ток через C .

Напряжение на лампе совпадает с напряжением на R и определяется выражением

$$5. \quad U_R = I_R \cdot R \cong I_L \cdot R(I)$$

Где I_R - ток лампы

I_L - ток дросселя

$R(I)$ - активное нелинейное сопротивление лампы, зависящее как от мгновенного, так и от среднего значений тока лампы.

Из уравнения (5) следует что, при питании прямоугольным напряжением, после выхода на рабочий режим расчеты с использованием представления элементов цепи комплексными величинами дают ошибку, которая может составлять 10-15%, и уменьшается по мере приближения к рабочему резонансу.

Таким образом, вблизи резонансов комплексное представление элементов цепи и тока цепи и напряжения на лампе дает точный результат расчетов. На частотах выше резонансов

точность комплексного представления вполне достаточна для практических расчетов даже вдали от резонансов.

Из приведенного наглядного представления процессов в цепи лампы при питании ее прямоугольным напряжением можно сделать следующие выводы:

1). На частотах выше резонанса можно проводить расчеты тока цепи, напряжения на конденсаторе C до зажигания лампы и напряжения на лампе после ее зажигания, пользуясь комплексным представлением элементов цепи и векторным представлением токов и напряжений цепи;

2). Подавая на цепь лампы прямоугольное напряжение на частоте значительно выше резонансной частоты контура, образованного дросселем L и конденсатором C , и плавно снижая подаваемую частоту, можно реализовать предварительный прогрев накала и запуск лампы, после которого резонансная частота контура цепи лампы резко снижается, так как вместо C в рабочий резонансный контур входит CI , емкость которого много больше емкости C . Для расчетов токов и напряжений при этом также можно пользоваться комплексными представлениями элементов цепи, хотя точность такого представления несколько ниже, чем при расчетах процесса пуска лампы.

3) Если после запуска лампы, в рабочем режиме, частота питания лампы остается выше резонансной частоты рабочего контура, можно поддерживать стабильный режим ее работы за счет корректирования рабочей частоты. Лампа является активной, хотя и нелинейной, нагрузкой. В первом приближении, при частоте питания лампы выше 1 кГц лампу после зажигания можно представить сопротивлением, эквивалентным ей по действующим значениям тока и напряжения.

Список литературы.

1. Особенности работы газоразрядных источников света в схемах подключения. URL: http://www.tehdizain.ru/osobennosti_raboti_gazorazryadnih_istochnikov_sveta_v_shemah_podklucheniya-a27.html (дата обращения: 26.06.2012)
2. Варфоломеев Л.П. Электронные пускорегулирующие аппараты и системы управления освещением / Новости светотехники. – 2002. – вып. 1 (36).
3. Тихомиров Ю.П. Электронные балласты люминесцентных ламп. Принципы построения. Схемотехника. URL: fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/power_factor_correction.pdf (дата обращения: 26.06.2012)
4. Мальков М.М., Каланов В.П., Малахов А.Д. Самосогласованная модель люминесцентной лампы. Часть 1. Моделирование электрических характеристик лампы и комплекта «лампа-ПРА» URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2195/doc/52645/> (дата обращения: 18.01.2007)

ELECTRONIC BALLASTS CIRCUIT DESIGN. HF CONVERTERS FOR FLUORESCENT LAMPS

Yuri Tikhomirov

CJSC Petushinsky metal factory, Moskva, Russia

Abstract. This article gives a short overview of existing technical solutions on HF converters, used in electronic ballasts of fluorescent lamps, on a physical model analyzed form of currents and voltages in the circuit of fluorescent lamp with a rectangular supply voltage of the lamp circuit in a startup mode, sweep frequency mode and run mode.

Keywords: fluorescent lamp; ballast; resonance; half bridge.