

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРНОГО МЕТОДА ДЛЯ РАСЧЕТОВ БАЛЛАСТОВ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Ю.П. Тихомиров

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

Аннотация. В статье представлен векторный метод расчета цепи люминесцентной лампы в режиме нагрева, в режиме зажигания и в рабочем режиме, с питанием цепи лампы прямоугольным напряжением. Представлены расчетные графики зависимости токов и напряжений на лампе при резонансном запуске и в рабочем режиме для реальной люминесцентной лампы на 18 Вт.

Ключевые слова: люминесцентная лампа, балласт, векторная диаграмма, резонанс, крест-фактор.

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

Введение.

До зажигания люминесцентная лампа тока не проводит, и при расчете цепи пускового контура ее влияние определяется только дополнительным затуханием, вносимым в контур нитями накала.

После зажигания, в рабочем режиме, люминесцентная лампа является активной, хотя и нелинейной, нагрузкой. В первом приближении, при частоте питания выше 1 кГц у лампы нет падающих участков вольтамперной характеристики [1], и цепь горячей лампы после зажигания можно представить сопротивлением, эквивалентным ей по действующим значениям тока и напряжения.

Такое представление дает возможность и в режиме пуска, и в рабочем режиме, применить для расчетов пускового и рабочего контура лампы представление элементов цепи лампы линейными комплексными величинами, а для анализа токов и напряжений в цепи лампы использовать векторную диаграмму.

Пусковой режим (до зажигания лампы)

При представлении элементов цепи (L,C,R) комплексными величинами, напряжение на резонансном конденсаторе (и на лампе) до ее зажигания, с учетом активных потерь в контуре [2], описывается формулой

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

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.

Расчет рабочего режима цепи лампы методом векторной диаграммы.

Для проведения расчетов рабочего режима цепи питания лампы, для расчета токов и напряжений на участках цепи можно также воспользоваться комплексным представлением элементов цепи, а для вывода формул применить метод векторной диаграммы [3].

Схема цепи питания лампы приведена на рис.1, а векторная диаграмма токов и напряжений в этой цепи – на рис.2.

Лампа с активным нелинейным сопротивлением R_L и пусковой конденсатор включены параллельно, и ток дросселя i_L распределяется между ними пропорционально их проводимости. Напряжение R_L и C будет общим. На векторной диаграмме ток лампы представлен вектором i_{R_L} , а ток конденсатора – вектором i_C , направленным под 90° к направлению вектора тока лампы. Суммарный ток через лампу и конденсатор представляет собой векторную сумму их токов и представлен вектором i_L , его величина и направление определяются формулами

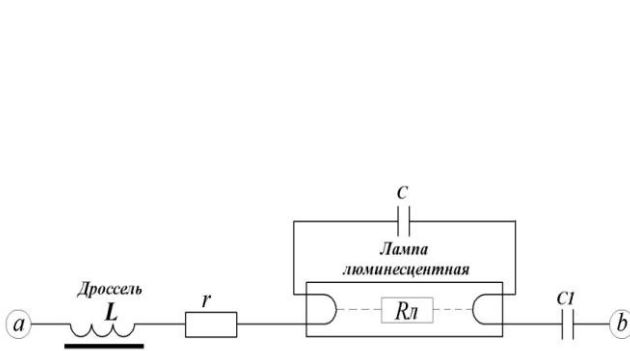


Рис.1 Цепь ВЧ питания лампы

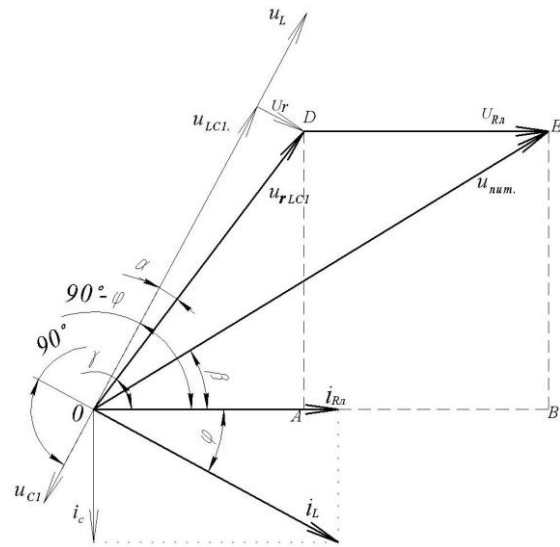


Рис.2 Векторная диаграмма

$$2. \quad i_L = \sqrt{i_{R_L}^2 + i_C^2}$$

$$3. \quad i_{R_L} = i_L \cos \varphi$$

$$4. \quad i_C = i_L \sin \varphi$$

$$5. \quad \varphi = \arctg \frac{i_C}{i_{R_L}} = \arctg \frac{u_{R_L} / (\frac{1}{\omega C})}{u_{R_L} / R_L} = \arctg (\omega R_L C)$$

Ток i_L протекает через индуктивность дросселя L и емкость конденсатора $C1$ рабочего контура. Напряжение на дросселе запаздывает по фазе относительно его тока i_L на 90° , а его величина определяется формулой $u_L = i_L \cdot \omega L$. Напряжение на конденсаторе $C1$ опережает по фазе ток цепи и его величина определяется выражением $u_{C1} = \frac{1}{\omega C_1}$. Реактивная составляющая напряжении цепи будет выражаться формулой

$$6. \quad u_{LC1} = i_L (\omega L - \frac{1}{\omega C1}).$$

В цепи присутствуют элементы с активным характером нагрузки, имеющие суммарное сопротивление r , фаза напряжения на котором совпадает с фазой тока, а величина определяется как $u_r = i_L \cdot r$.

Таким образом, величина напряжения u_{rLC1} на всех элементах, включенных в цепь последовательно, определится выражением

$$7. \quad u_{rLC1} = \sqrt{u_{LC1}^2 + u_r^2} = i_L \cdot \sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2 + r^2}$$

Для угла α сдвига между u_{rL} и u_{LC1} справедливо выражение

$$8. \quad \alpha = \arctg \frac{u_r}{u_{LC1}} = \arctg \frac{r}{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1}\right)}$$

Угол между током лампы i_{Rn} и напряжением u_{LC1} на реактивном сопротивлении последовательного контура, образованного дросселем L и конденсатором $C1$, составляет $90^\circ - \varphi$, следовательно, угол γ между напряжением u_{rLC1} (с учетом поправки на его активное сопротивление) и напряжением на сопротивлении лампы u_{Rn} , по направлению совпадающим с током лампы, определяется выражением $\gamma = 90^\circ - \varphi - \alpha$.

Для расчета вектора u_{num} сделаем дополнительное построение: из центра координат «О» в направлении тока лампы i_{Rn} проведем прямую. На нее из точек D и E проведем отрезки DA и EB, перпендикулярные OB. Из построения следует:

$$EB = DA = OD \sin \gamma; \quad OA = OD \cos \gamma; \quad DE = AB; \quad OB = OA + AB = OD \cos \gamma + AB$$

$$\text{Где:} \quad OD = i_L \cdot \sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2 + r^2}$$

$$AB = i_L R_n \cos \varphi$$

следовательно:

$$9. \quad OE = \sqrt{(OD \cos \gamma + AB)^2 + (OD \sin \gamma)^2}$$

$$10. \quad \beta = \arctg \frac{OD \sin \gamma}{OD \cos \gamma + AB}$$

После подстановки выражений для OE, AB и OD, получим:

$$11. \quad u_{num} = i_L \sqrt{\left[\sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2 + r^2} \cos \gamma + i_L R_n \cos \varphi \right]^2 + \left[\sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2 + r^2} \sin \gamma \right]^2}$$

Отсюда следует:

$$12. \quad i_L = \frac{u_{num}}{\sqrt{\left[\sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2 + r^2} \cos \gamma + i_L R_n \cos \varphi \right]^2 + \left[\sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2 + r^2} \sin \gamma \right]^2}}$$

$$13. \quad \beta = \arctg \frac{i_L \cdot \sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2 + r^2} \sin \gamma}{i_L \sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2 + r^2} \cos \gamma + R_n^2 \cos^2 \varphi} = \arctg \frac{\sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2 + r^2} \sin \gamma}{\sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2 + r^2} \cos \gamma + R_n^2 \cos^2 \varphi}$$

$$14. \quad u_{Rn} = i_L R_n \cos \varphi$$

Где: i_L - ток, потребляемый от источника питания;
 u_{num} - напряжение питания;

β - угол между напряжением питания и напряжением на лампе;

u_{R_l} - напряжение на лампе;

ω - круговая частота первой гармоники генератора;

L - индуктивность дросселя;

C - емкость пускового конденсатора;

r - сопротивление цепи дросселя;

R_l - сопротивление лампы после зажигания;

C_1 - емкость конденсатора рабочего контура;

φ - угол между током контура и напряжением на лампе, $\varphi = \arctg \omega R_l C$;

α - угол поправки на активное сопротивление контура, $\alpha = \arctg \frac{r}{\omega L - \frac{1}{\omega C_1}}$;

γ - угол между напряжением на последовательно включенных элементах RLC1 и на лампе, $\gamma = 90^\circ - \varphi - \alpha$

Графики зависимости тока контура i_L и напряжения на лампе u_{R_l} от частоты питания, рассчитанные (с помощью Excel) по формулам 1, 12 и 14, приведены на рис. 3.

Графики построены при следующих параметрах элементов цепи лампы:

$C = 6800$ пф; $r = 10$ Ом; $R_l = 145$ Ом (в рабочем режиме);
 $L = 2,5$ мГн; $U_{num} = 300$ В; $C_1 = 0,012$ мкф (0,022 мкф).

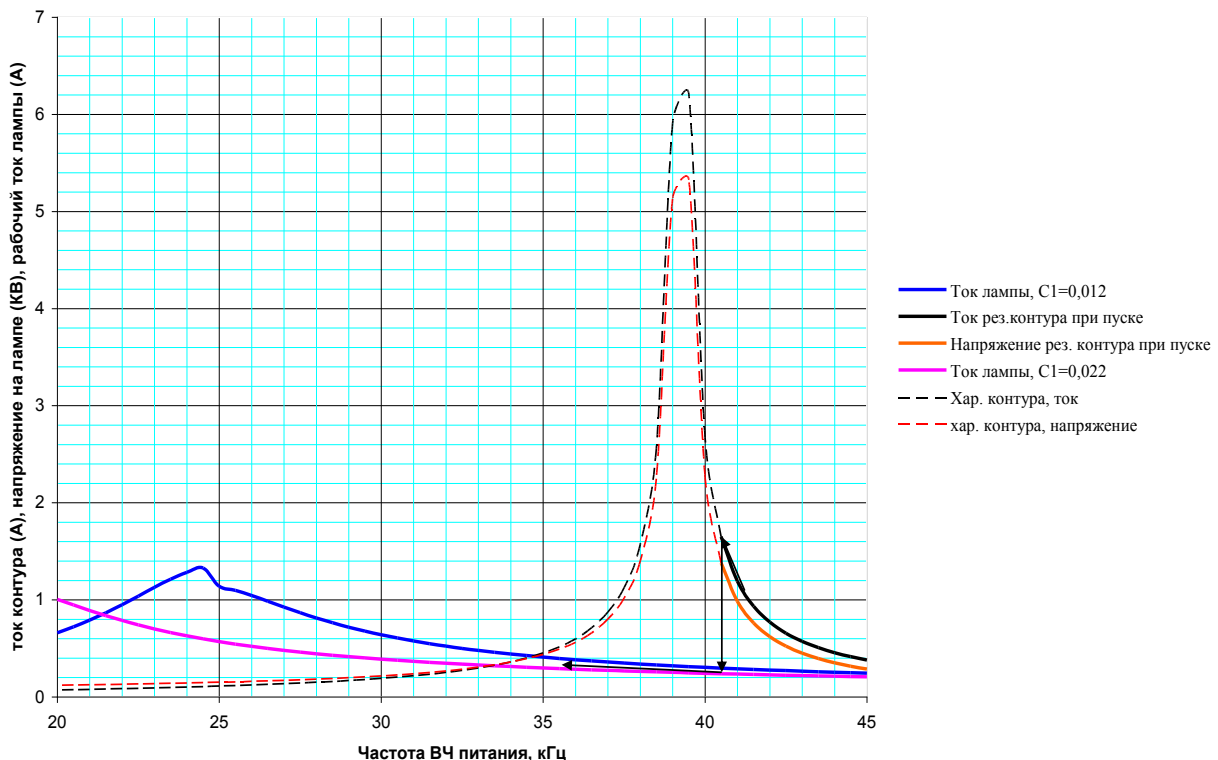


Рис.3 Токи и напряжения на лампе при прохождении частоты питания сверху вниз

По приведенным графикам можно легко проследить ход изменений токов и напряжений на лампе при изменении частоты питания цепи.

Начав с высокой частоты и постепенно снижая ее, мы движемся по кривым тока и напряжения пускового контура, до тех пор, пока межэлектродный промежуток лампы не

пробьется. Напряжение, при котором пробой произойдет, может составлять от 600 до 1200В. На диаграмме это соответствует, приблизительно, частоте 41 кГц и току контура 1,7А.

Как только пробьется межэлектродный промежуток лампы, она зажжется, и ток лампы на той же частоте 40 кГц будет определяться точкой на кривой «ток лампы», соответствующей этой частоте. В зависимости от параметров последовательного рабочего контура и от напряжения питания, ток на частоте зажигания лампы может быть как меньше, так и больше оптимального для лампы. В приведенном примере напряжение питания выбрано 150 вольт: это половина напряжения, получаемого с выпрямителя с емкостным выходным фильтром, питающегося непосредственно от сети 220 вольт. Для получения оптимального рабочего тока частоту питания подстраивают (снижают) до тех пор, пока не будет достигнут оптимальный режим работы лампы.

Основным недостатком питания балласта от подобного выпрямителя является чрезвычайно низкий коэффициент мощности, составляющий около 0,5. Для повышения коэффициента мощности до 0,95 – 0,99 применяют корректоры коэффициента мощности повышающего типа, отличительной особенностью которых является более высокое напряжение питания балласта, минимум 360 В. При этом, если применить описанный выше балласт, ток в точке на рабочей кривой, в которую цепь выйдет после зажигания лампы, окажется слишком высоким. Вывести лампу в оптимальный режим можно было бы, подняв рабочую частоту питания после зажигания лампы, но это не предусмотрено в выпускаемых контроллерах.

Для того, чтобы при питании от корректора коэффициента мощности повышающего типа, снизить ток в точке выхода на рабочую кривую ниже оптимального значения, используют следующие приемы:

- Увеличивают индуктивность дросселя, одновременно снижая емкость конденсатора С;
- Включают до 2 ламп 36 Вт или по 3-4 лампы 18 Вт последовательно на 1 дроссель.

На рисунке 7 приведен пример пусковой и рабочей характеристик балласта с увеличенной индуктивностью дросселя и с питанием от корректора коэффициента мощности (180В)

$$C = 4700\text{пф};$$

$$L = 3,5\text{мГн};$$

$$r = 10 \text{ Ом};$$

$$U_{\text{ном}} = 360 \text{ В};$$

$$R_{\text{л}} = 145 \text{ Ом (в рабочем режиме)};$$

$$C1 = 0,022\text{мкф}.$$

Пусковая и рабочая характеристики балласта

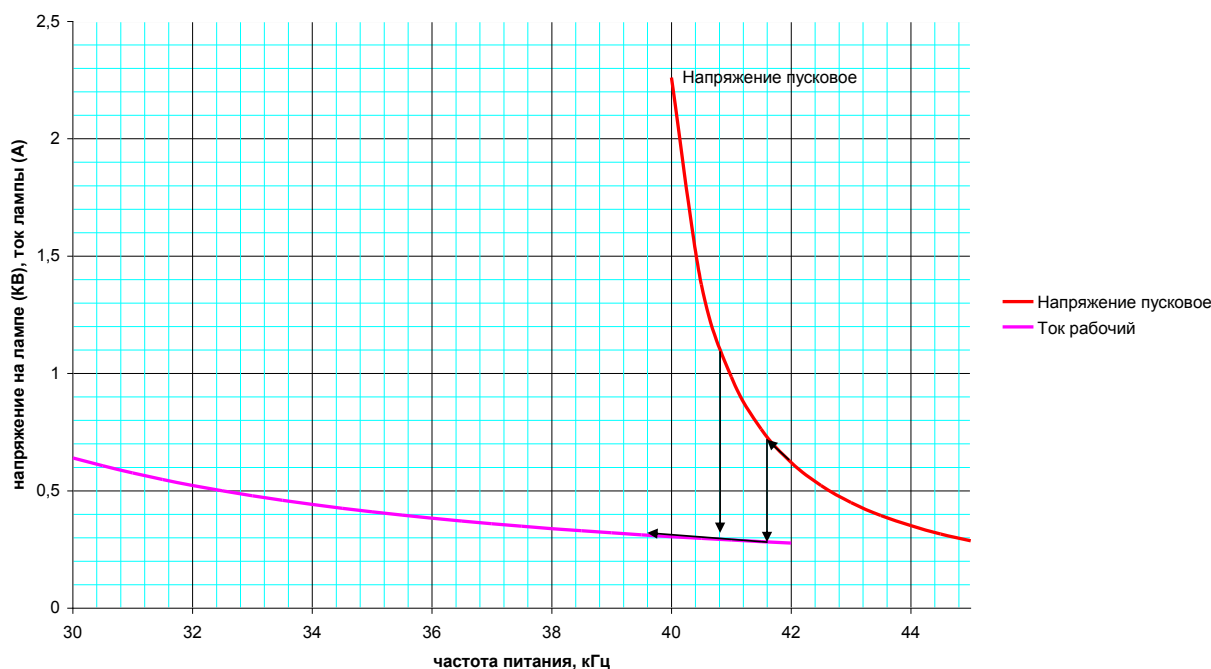


Рис.4 Пусковая и рабочая характеристики балласта на $U_{num}=360В$

Из приведенной диаграммы видно, что и для таких параметров питания можно выбрать элементы цепи, при которых, при скольжении частоты сверху вниз, лампа запустится и выйдет на рабочий режим, который легко поддерживать на заданном уровне за счет корректировки частоты питания.

Простота реализации запуска лампы и корректировки режима работы лампы по току определила то, что именно принцип скольжения частоты питания сверху вниз, от повышенной стартовой частоты до относительно низкой рабочей частоты, служит основой всех выпускаемых в настоящее время интегральных контроллеров электронных балластов люминесцентных ламп, например, популярного контроллера IR2520 [4]. Контроллеры балластов реализуют последовательно включаемые функции управления предварительным прогревом нитей накала люминесцентных ламп, пуском и рабочим режимом.

Список литературы

1. Мальков М.М., Каланов В.П., Малахов А.Д. Самосогласованная модель люминесцентной лампы. Часть 1. Моделирование электрических характеристик лампы и комплекта «лампа-ППА». URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2195/doc/52645/> (дата обращения: 20.06.2012)
2. Ток и напряжение при последовательном соединении R,L,C. Казанский государственный энергетический университет, Курс лекций по ТОЭ часть 1, л.24. URL: <http://toe-kgeu.ru/toe1/281-toe1> (дата обращения: 20.06.2012)
3. Векторные диаграммы, Учебник по теоретическим основам электротехники, раздел 3.4. URL: <http://electrofaq.com/TOEbook/toe.html> (дата обращения: 20.06.2012)
4. International Rectifier, Data Sheet No PD60212 Rev A, page7-8. URL: http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/2/5/IR2520D.shtml (дата обращения: 20.06.2012)

APPLICATION OF VECTOR METHOD PAYMENT FOR BALLAST FLUORESCENT LAMPS

Yuri Tihomirov
CJSC Petushinsky metal factory, Moskva, Russia

Abstract. The article presents a phasor method for calculating of a fluorescent lamp circuit in the heating mode, in ignition mode, and run mode, with a rectangular supply voltage of lamp circuit. Presented the calculated diagrams of dependence of the currents and voltages on the lamp at resonant startup and at run mode for real fluorescent lamp on 18W

Keywords: fluorescent lamp, ballast, phasor method, resonance, crest factor.