

УДК 621.38.002

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУСКРЕГУЛИРУЮЩИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

С.Н. КУХАРЕНКО, Н.И. ВЯХИРЕВ, Б.А. ВЕРИГА

*Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого, Республика Беларусь*

Люминесцентные лампы в настоящее время являются одним из наиболее совершенных источников света. От ламп накаливания они отличаются высокой эффективностью преобразования электроэнергии в световой поток, большим сроком службы. Для создания одной и той же освещенности люминесцентной лампой требуется в 3 - 4 раза меньше электроэнергии, срок их службы в 5 - 7 раз выше, чем у ламп накаливания [1].

Включение люминесцентной лампы в электрическую цепь должно осуществляться с помощью схемы, которая обеспечивает ее зажигание, нормальный режим работы, подавление радиопомех, возникающих при зажигании и работе лампы.

В настоящей работе рассматриваются различные пускорегулирующие аппараты (ПРА) для люминесцентных ламп. Исследуются параметры ПРА, выпускаемых промышленностью и разработанные авторами. Рассматривается электромагнитная совместимость ПРА различных типов.

Широко распространены схемы включения люминесцентных ламп в сеть промышленной частоты через дроссельное устройство - электромагнитный пускорегулирующий аппарат, который обеспечивает зажигание лампы и необходимое напряжение на ней в рабочем режиме.

Однако традиционное питание люминесцентных ламп током промышленной частоты не позволяет в полной мере использовать преимущества данных источников света. Переменный ток частоты 50 Гц в моменты его перехода через нуль приводит к погасанию лампы и последующему перезажиганию. Вследствие этого световой поток получается сильно промодулированным двойной частотой питающей сети. Модуляция света приводит к возникновению стробоскопического эффекта, увеличивает утомляемость работающих в помещениях с таким освещением, снижает эффективность преобразования электрической энергии в световой поток. Процесс перезажигания ускоряет выгорание катодного покрытия лампы и снижает ее ресурс. Электромагнитные пускорегулирующие аппараты, работающие на частоте промышленной сети, часто являются источником шума и сильных импульсных электромагнитных помех при зажигании лампы, приводящих к сбоям в работе оборудования.

Необходимо также отметить, что в схеме с электромагнитным ПРА лампа подключена непосредственно к питающей сети. Нелинейная характеристика дугового разряда приводит к возникновению высших гармоник тока в питающей сети и, следовательно, к дополнительным потерям в энергосистеме. Кроме того, дополнительные потери вызваны увеличением реактивной составляющей тока в сети вследствие активно-индуктивного характера импеданса ПРА. Косинусный регулятор электронных ПРА позволяет создавать чисто активный характер нагрузки.

Существенное ограничение применения люминесцентных ламп с традиционным питанием связано с тем, что электромагнитные ПРА позволяют обеспечить работу ламп только при положительных температурах [2]. Это объясняется снижением эмиссионных свойств катодов при отрицательных температурах.

В последние годы широко проводились исследования по питанию люминесцентных ламп напряжением (током) повышенной частоты. Были созданы и эксплуатируются осветительные установки с различными системами питания на повышенных частотах. Это обусловлено рядом преимуществ ламп с таким питанием:

- увеличивается световая отдача;
- увеличивается срок службы ламп вследствие отсутствия перезажигания;
- уменьшаются размеры ПРА, их вес и материалоемкость;
- уменьшаются потери мощности в ПРА за счет уменьшения активного сопротивления обмотки дросселя;
- практически полностью отсутствуют пульсации светового потока;
- возможна работа лампы с электронным ПРА при отрицательных температурах.

Перечисленные преимущества электронных ПРА позволяют создавать светотехнические изделия с новыми потребительскими качествами. В Республике Беларусь производство электронных ПРА налажено на минских заводах «Калибр», «Электроника» и некоторых других. Все эти аппараты работают в автоколебательном режиме. Типичная функциональная схема таких устройств приведена на рис. 1.

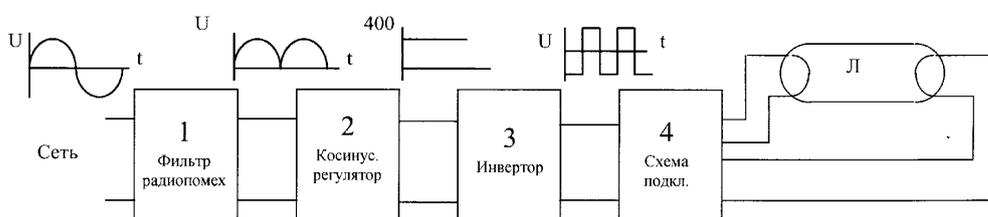


Рис. 1. Функциональная схема выпускаемых электронных ПРА

На входе схемы ПРА включен фильтр радиопомех, который служит для предотвращения проникновения импульсных помех в электрическую сеть. Переменное напряжение сети на выходе фильтра с помощью выпрямителя преобразуется в постоянное, корректируется фильтром гармонических составляющих тока - косинусным регулятором. Напряжение на выходе косинус-регулятора равняется примерно 400 В. Это напряжение является питающим для инвертора, который представляет собой автоколебательный генератор прямоугольных импульсов. Лампа включается в колебательный контур на выходе инвертора, образующий схему подключения.

ПРА, построенные по такому принципу, неплохо зарекомендовали себя в работе. По сравнению с электромагнитными до 20% увеличивается эффективность преобразования, в среднем на 20% увеличивается срок службы лампы, в 3 - 4 раза меньше потери мощности в ПРА.

Однако автоколебательные ПРА имеют существенные недостатки.

Частота колебаний инвертора определяется комплексом параметров. Кроме того, рабочая частота и передаваемая в лампу мощность сильно зависят от состояния и параметров самой лампы. Поэтому технологическая повторяемость характеристик инверторов довольно низкая и они изменяются в процессе старения лампы [3].

Включение и последующая работа инвертора происходит на частоте, близкой к резонансной. Поэтому в момент пуска в колебательном контуре накапливается большая энергия (амплитуда тока, коммутируемого транзисторами, достигает 10 А), и если по каким-либо причинам пробой газоразрядного промежутка лампы невозможен, то это неизбежно ведет к выходу транзисторов инвертора из строя.

Изложенных недостатков лишен разработанный авторами электронный ПРА. Функциональная схема аппарата приведена на рис. 2. Принципиальное отличие этого ПРА от известных состоит в построении инвертора.

Инвертор выполнен по полумостовой схеме на двух ключевых транзисторах. Ключи управляются схемой управления, представляющей собой симметричный мультивибратор, частота колебаний которого управляется током схемы питания и защиты. В схеме управления формируется необходимая функциональная зависимость частоты колебаний от режима работы.

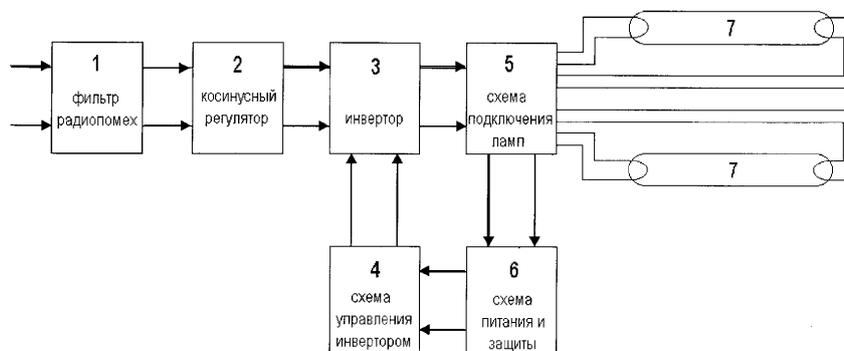


Рис. 2. Функциональная схема разработанного электронного ПРА

Таким образом, в данном ПРА исключается влияние характеристик лампы на параметры инвертора, в первую очередь, частоту колебаний. Частота колебаний инвертора определяется резистивными и емкостными элементами схемы управления. Это позволяет достичь более высокой повторяемости характеристик ПРА, стабильности его работы и повышения КПД устройства. Предложенное функциональное построение устройства позволяет создавать многоламповые электронные ПРА с использованием одного управляемого инвертора, причем рабочие режимы одних ламп не зависят от технического состояния других и наличия других ламп вообще.

Запуск устройства осуществляется на частоте 70-80 кГц. На этой частоте происходит разогрев катодов лампы с последующим снижением частоты до 44 кГц. При приближении частоты управления к резонансной частоте LC контура, к которому подключена лампа, на конденсаторе возникает напряжение, достаточное для пробоя разрядного промежутка лампы. Разработанный ПРА обеспечивает предварительный разогрев катодов лампы, создает пробивное напряжение разрядного промежутка и последующее удержание стабильного тока лампы в рабочем режиме, что увеличивает срок службы люминесцентных ламп [4].

В ПРА предусмотрена защита от токовой перегрузки транзисторов инвертора, работающая по следующему алгоритму. При снижении рабочей частоты инвертора и приближении ее к резонансной в LC контуре накапливается энергия и растет коммутируемый транзисторами ток. Как только ток превысит установленное значение, срабатывает триггер в схеме управления, который изменяет частоту до исходного значения 70-80 кГц и через 2 - 3 секунды процесс запуска повторяется [4].

Эффективность ПРА с управляемым инвертором выше за счет снижения динамических потерь в ключах инвертора, при выключении [5]. Существенно улучшается температурный режим выходных транзисторов инвертора, в сравнении с автоколебательным режимом. Кроме того, в таких ПРА изменением частоты колебаний появляется возможность управлять световым потоком лампы.

Технические характеристики светильников с рассмотренными ПРА приведены в Таблице 1, измерения проводились с использованием номинальных ламп при номинальном напряжении сети. Нормированная (активная) мощность определяется как отношение потребляемой активной мощности к величине светового потока.

Технические характеристики рассматриваемых ПРА

Тип ПРА	Коэффициент мощности	Мощность ламп, Вт	Активная нормированная мощность, Вт/ед	Масса, кг
Электромагнитный	0,84	2×40	105	1.4
Разработанный	0,95	2×40	86	0.6
Завода «Калибр»	0,95	2×40	90	0.55
Завода «Электроника»	0,9	1×40	88.5	0.35

Сравним, наконец, все рассмотренные выше ПРА по электромагнитной совместимости. Люминесцентные лампы вместе с ПРА излучают электромагнитные импульсные помехи, которые могут мешать работе радиоэлектронной аппаратуры. Помехи возникают во время зажигания лампы и во время ее работы.

Импульс тока, возникающий при включении лампы, создает импульсное электромагнитное излучение. Вследствие малой электрической длины лампы l ток в ней можно считать однородным:

$$I(z, t) = I(t),$$

где z - координата вдоль оси лампы. Этот ток можем представить в виде обратного преобразования Фурье от спектральной плотности $S(\omega)$:

$$I(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Напряженность электрического поля $E(\omega)$ на фиксированной частоте ω на расстоянии r от лампы определяется соотношением.

$$E(\omega) = \frac{S(\omega)lc}{4\pi j\omega} W_0 \frac{e^{-\frac{j\omega r}{c}}}{r^3} \sin\theta,$$

где c - скорость света, $W_0=120\pi$ Ом - характеристическое сопротивление свободного пространства и угол θ отсчитывается от оси лампы.

Излученный импульс определяется обратным преобразованием Фурье от этого выражения:

$$e(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega) e^{j\omega t} d\omega = \frac{lW_0c}{4\pi r^3} \sin\theta \int_0^t I\left(t - \frac{r}{c}\right) dt.$$

Ток лампы измерялся с помощью электрически малой проволочной рамки, замкнутой на постоянный резистор R_n . Рамка размещалась вблизи лампы и магнитное поле тока лампы создает э.д.с. индукции и, следовательно, ток в ней. Падение напряжения на R_n , таким образом, функционально связано с током лампы и напряженностью электрического и магнитного полей.

На рис. 3 приведен экспериментальный импульс тока при разжигании люминесцентной лампы с электромагнитным ПРА. Максимальное значение тока составляет примерно 6 А, а форма напряжения на рамке полностью совпадала с формой тока.

Измеренная кривая тока аппроксимировалась функцией, неплохо согласующейся с приведенной на рис. 3:

$$I_{ам}(t) = I_0 e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t,$$

где $I_0=10$ А, $\alpha=5,5 \cdot 10^6$ неп/сек, $\omega_0=15 \cdot 10^6$ рад/сек. Подстановка этих значений в вы-

ражение для $e(t)$ дает для $r=3\text{ м}$ и $\theta=90^\circ$ максимальное значение амплитуды излученного импульса поля - 7 В/м . Такое значение поля электромагнитной помехи многократно превышает допустимое по ГОСТ. Форма излученного импульса имеет вид затухающей

синусоиды, спектр которой пропорционален величине $\frac{1}{(\alpha + j\omega)^2 + \omega_0^2}$ и имеет довольно большую интенсивность вплоть до частот в несколько МГц.

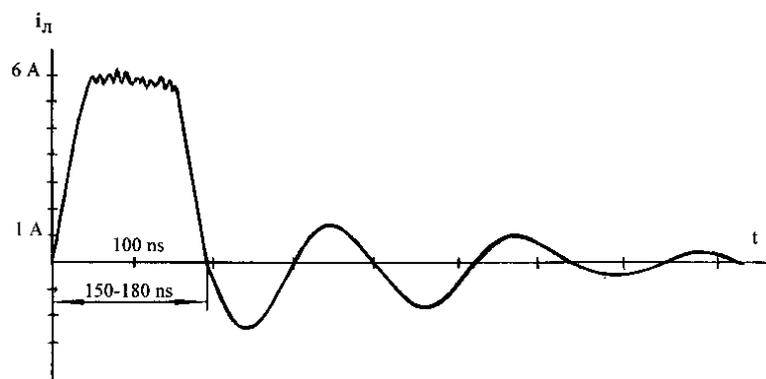


Рис. 3. Форма тока лампы при разжигании с электромагнитным ПРА

Электронные ПРА практически не имеют импульсов излучения при зажигании лампы, это было подтверждено экспериментально.

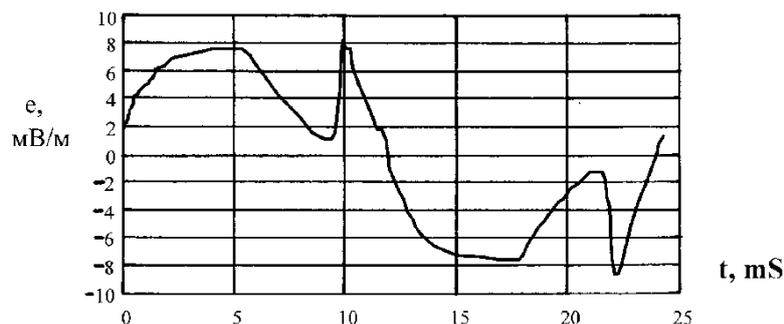
Электромагнитные помехи работающей лампы также различны при их питании через дроссельное устройство и электронным аппаратом. На рис.4 приведены осциллограммы напряженности электрического поля на расстоянии 3 м от лампы для различных ПРА. Во всех случаях расчет тока по результатам измерения поля дает действующее значение первой гармоники, примерно равное $0,4\text{ А}$ и совпадающее с результатами прямых измерений тока лампы.

Прямое излучение такого тока для лампы с электромагнитным ПРА на расстоянии $r=3\text{ м}$ создает напряженность электрического поля $e(t) \cong 6\text{ мВ/м}$ и не оказывает никакого влияния на работу радиоприемных устройств. Однако при питании лампы электромагнитным ПРА (рис.4а) вследствие ее перезажигания на излученное поле накладывается последовательность коротких импульсов перезажигания с амплитудой до 10 мВ/м (для $r=3\text{ м}$). Такая помеха оказывает влияние на работу радиоприемных устройств длинноволнового и средневолнового диапазона, расположенных вблизи лампы.

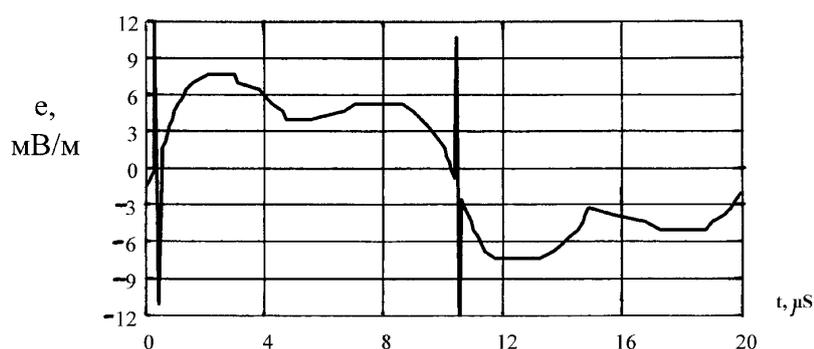
При питании лампы электронным ПРА помехи из-за ее перезажигания отсутствуют, так как инерционность дугового разряда лампы достаточно велика и лампа не погасает в моменты прохождения тока через нуль.

Электронные ПРА автоколебательного типа создают помеху малой интенсивности при работе лампы, связанную с негармоническим характером тока через лампу (рис.4б). На работу радиоприемных устройств эта помеха оказывает очень слабое влияние. В случае ПРА с принудительным возбуждением она еще меньше, так как ток лампы практически синусоидальный (рис.4в).

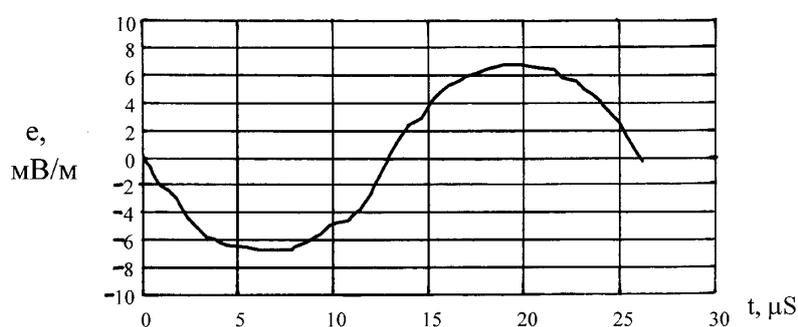
Таким образом, приведенные исследования показали значительно более высокие характеристики электронных ПРА люминесцентных ламп по сравнению с электромагнитными. Разработанный в ГГТУ им. П.О. Сухого ПРА обладает такими положительными свойствами, как хорошая повторяемость характеристики, стабильность в работе при изменении внешних параметров, повышенный коэффициент полезного действия, низкий уровень электромагнитных помех, повышенный срок службы и расширенный, в сторону низших температур, диапазон применяемости люминесцентных ламп.



а) с электромагнитным ПРА



б) с электронным автоколебательным ПРА



в) с разработанным ПРА

Рис.4. Напряженность электрического поля, излучаемого работающей лампой ($\tau = 3\text{м}$)

Литература

1. Справочная книга по светотехнике /Под ред. Ю.А. Айзенберга.- М.: Энергия, 1983.
2. ГОСТ 6825-74. Лампы люминесцентные ртутные низкого давления.- С.19.
3. Букреев С.С., Головацкий В.А., Гулякович Г.Н. и др. Источники вторичного электропитания /Под ред. Ю.И. Конева. - М.: Радио и связь, 1983.- С.69-79.
4. Кухаренко С.Н. Электронный пускорегулирующий аппарат для люминесцентных ламп. Современные проблемы машиноведения: Материалы международной научно-технической конференции /Под ред. д.т.н., профессора А.С. Шагиняна.- Гомель: ГПИ, 1998.- Т.II.- С.156-158.
5. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем.- 4-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергия, 1972.- С.478-496; 612-619.