

## Электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА): история, принцип работы, проблемы. Популярные микросхемы для ЭПРА

Борис ТЕРЕНТЬЕВ  
bt@gamma.spb.ru

Появление люминесцентных ламп явилось следствием попыток развить достоинства ламп накаливания и минимизировать их недостатки, в частности, увеличить срок службы и экономичность лампы. Обе эти задачи были успешно решены. Время работы люминесцентных ламп составляет порядка 12–15 тысяч часов (для сравнения — срок службы ламп накаливания составляет около тысячи часов). При этом их световая отдача превышает световую отдачу ламп накаливания примерно в пять раз.

Люминесцентные лампы представляют собой газоразрядные источники света, работающие по следующему принципу: под воздействием электрического поля в парах ртути, закачанной в герметичную стеклянную трубку, возникает электрический разряд, сопровождающийся ультрафиолетовым излучением. Нанесенный на внутреннюю поверхность трубки люминофор преобразует ультрафиолетовое излучение в видимый свет. Подбирая соответствующие виды люминофора, можно изменять цветовые характеристики лампы.

По форме различаются линейные, кольцевые, U-образные, а также компактные люминесцентные лампы.

Схема люминесцентной лампы приведена на рис. 1.

Люминесцентные лампы, как и все газоразрядные лампы, из-за их отрицательного внутреннего сопротивления не могут работать непосредственно с сетевым напряжением и нуждаются в соответствующих пускорегулирующих аппаратах (ПРА). Основные функции ПРА:

- предварительный нагрев катодов для инициации эмиссии электронов;
- создание стартового напряжения, вызывающего разряд;
- ограничение протекающего тока.

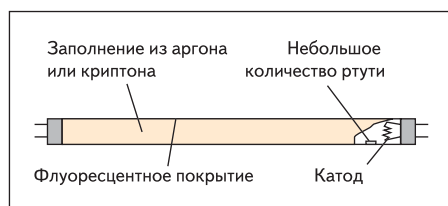


Рис. 1. Люминесцентная лампа

До последнего времени схема ПРА выглядела, как показано на рис. 2.

При замыкании выключателя напряжение сети прикладывается к стартеру. Стартер состоит из стеклянного баллона, заполненного инертным газом, в котором размещены биметаллические контакты, к выводам которых припаян конденсатор для подавления радиопомех. Баллон и конденсатор помещаются в отдельный кожух.

Под действием сетевого напряжения газовый промежуток в стартере ионизируется. Ток 0,05 А протекает по цепи: сеть, дроссель, катод лампы, стартер, катод лампы, сеть. Ионизированный газ нагревает биметаллические контакты, которые замыкаются через доли секунды, и ток возрастает до 0,5 А. Катоды лампы разогреваются, испускаются электроны, вызывающие нагрев газовой смеси в лампе.

После замыкания биметаллических контактов ионизация газа в стартере прекращается. Стартер начинает остывать, и через десятки доли секунды контакты размыкаются. Ток в цепи прекращается. В дросселе возникает ЭДС самоиндукции 600–800 В. Напряжение самоиндукции складывается с амплитудным напряжением сети и вызывает пробой газового промежутка в лампе. Ток протекает по цепи: сеть, дроссель, катод лампы, газовый промежуток, катод лампы, сеть.

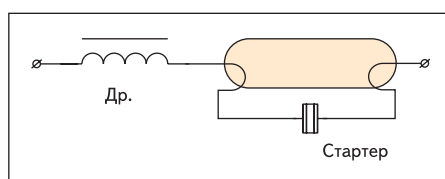


Рис. 2. Схема электромагнитного ПРА

Разряд в парах ртути создает ультрафиолетовое излучение. Оно воздействует на люминофор и вызывает его свечение в видимом спектре.

После зажигания лампы ее сопротивление уменьшается и на обмотке дросселя создается падение напряжения 100–110 В, а на лампе — 100–120 В. Стартер, рассчитанный на рабочее напряжение 220 В, перестает работать и окончательно остывает. Для предотвращения снижения  $\cos \phi$  (коэффициента мощности) за счет индуктивности, к зажимам сети иногда подключают бумажный конденсатор емкостью 3–9 мкФ, рассчитанный на напряжение 400 В (на рис. 2 не показан).

Такая схема обладает рядом недостатков:

- Питание током сетевой частоты может вызывать мерцание лампы, причем не обязательно с частотой 100 Гц (когда сетевое напряжение переходит через 0, газ частично деактивируется и свечение падает). Мерцание может происходить не каждый полупериод, а каждые 3 — 4 — 5 полупериодов.
- Дроссель на сетевой частоте часто гудит.
- Стартер, работающий не синхронно с сетевой частотой, вызывает так называемый фальш-старт лампы (несколько вспышек перед зажиганием), последний снижает ресурс работы лампы в несколько раз.
- Коэффициент мощности цепи лампы вследствие наличия дросселя не превышает 0,5. При мощности лампы 40 Вт 12–15 Вт расходуется в дросселе на его нагрев до 100 °С и выше, а коэффициент мощности ( $\cos \phi$ ), равный 0,5, говорит о том, что такое устройство представляет собой весьма неудачную нагрузку для сети.
- При выходе лампы из строя через конденсатор, подключенный параллельно зажимам сети, просто течет реактивный ток 0,6 А.

При выходе из строя конденсатора коррекция коэффициента мощности прекращается, но определить это «на глаз» нельзя, так как визуально ничего не меняется.

Электронные балласты появились в начале 80-х, а с начала 90-х завоевали широкую популярность. По сравнению с электромагнитными балластами, электронные балласты являются достаточно дорогими устройствами, однако начальные затраты компенсируются их высокой экономичностью. Их основные преимущества по сравнению с электромагнитными ПРА:

- уменьшение на 20% энергопотребления (при сохранении светового потока) за счет повышения светоотдачи лампы на повышенной частоте и более высокого КПД ЭПРА по сравнению с электромагнитным ПРА;
- увеличение на 50% срока службы ламп благодаря щадящему режиму работы и пуска;
- снижение эксплуатационных расходов за счет сокращения числа заменяемых ламп и отсутствия необходимости замены стартеров;
- дополнительное энергосбережение до 80% при работе в системах управления светом;
- отсутствие шумов;
- отсутствие мерцания;
- стабильность освещения при колебаниях электрического напряжения (обычно в пределах 200–250 В);
- возможность управлять яркостью лампы.

Блок-схема электронного балласта приведена на рис. 3.

Для исключения мерцаний и гула следует питать лампу током высокой частоты (20 кГц и выше). Для повышения коэффициента мощности ( $\cos \phi$ ) реактивный ток должен возвращаться не в сеть, а в промежуточный накопитель, не связанный с ней, и подпитывающий лампу при переходе сетевого напряжения через ноль. Таким образом, схема будет состоять из сетевого выпрямителя, ВЧ-генератора высокого напряжения и реактивного балласта. При этом предпочтительно подключать параллельно лампе не стартер, а конденсатор, замыкающий первичную цепь и создающий условие резонанса. Балласт фактически превращается в импульсный источник питания и требует защиты как по входу, так и по выходу.

Учитывая, что холодный пуск снижает время работы лампы в несколько раз, необходимо предварительно разогреть ее электроды. Кроме того, необходимо реализовать защиту генератора от неисправной лампы, а любой импульсный источник питания должен на входе иметь эффективный помехоподавляющий фильтр. Отсутствие фильтра на входе приведет к отсутствию электромагнитной совместности (ЭМС) в помещении с чувствительной и тонкой измерительной аппаратурой.

Наиболее часто для управления лампами применяются полумостовые схемы. Обобщенная полумостовая схема приведена

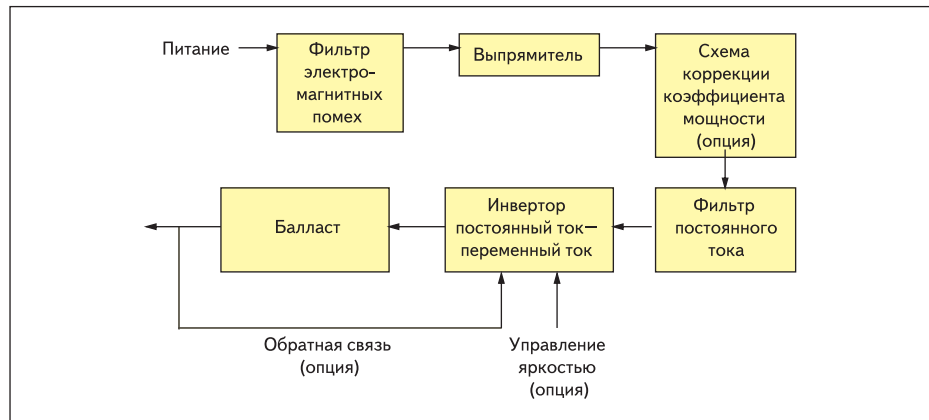


Рис. 3. Блок-схема электронного балласта

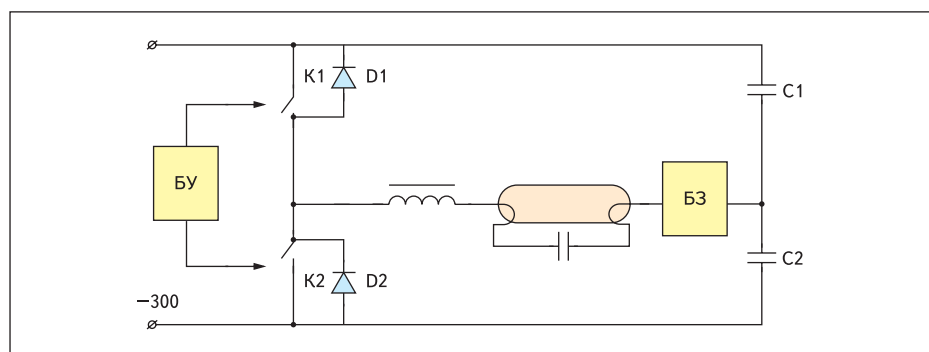


Рис. 4. Обобщенная полумостовая схема

на рис. 4. Она является инвертором постоянного выпрямленного сетевого напряжения в переменное ВЧ-напряжение. Здесь K1 и K2 — ключи, управляемые логическим блоком БУ, а БЗ — блок защиты от деактивированной лампы. Конденсаторы C1 и C2 образуют искусственный ноль.

Последний вопрос: как разогреть электроды лампы перед пуском? Видимо, самым красивым решением является частотный метод управления, который должен обеспечивать БУ.

Реактивный ток балластного дросселя будет подзаряжать конденсатор фильтра сетевого выпрямителя вместе с конденсаторами C1, C2. Так как защита по выходу от деактивированной лампы возлагается на блок защиты БЗ, включенный в ее цепь, то появляется возможность параллельно включить вторую лампу со своим балластным дросселем и блоком защиты. При этом, при выходе из строя одной лампы, вторая будет нормально работать.

Мостовая схема не получила широкого распространения, так как содержит вдвое больше силовых транзисторов. Ее применение оправданно только при больших мощностях (сотни ватт) или при использовании люминесцентных ламп с большим рабочим напряжением, например, импортных люминесцентных мощностью 80 Вт и более, либо ламп типа ДРЛ. В мостовой схеме (или полном инверторе) нагрузка (в данном случае лампа) находится в одной диагонали моста транзисторов, а питающий источник (при-

чем один) — в другой диагонали. По сравнению с полумостом мост имеет более низкий КПД (на один переход транзистора больше).

В настоящее время ЭПРА, представленные на рынках России, можно разделить на две группы по ценовому признаку: простые ЭПРА, сопоставимые по цене с электромагнитными балластами (70–80 руб. за ЭПРА 2×40 Вт) и высококачественные ЭПРА, по цене намного превосходящие электромагнитные (350–600 руб. за ЭПРА 2×40 Вт). Трудности реализации качественных ЭПРА обусловлены:

- низкими тарифами на электроэнергию;
- действиями недобросовестных фирм-однодневок, желающих получить сиюминутную прибыль за счет прямого подлога и нарушения требований ГОСТ;
- косностью мышления потребителя, оценивающего сиюминутную выгоду при приобретении осветительных систем;
- жесткой конкуренцией с электромагнитными балластами.

Для реализации балластов первой группы, независимо от страны происхождения (Китай, Россия, Турция, страны Балтии, Белоруссия), применяется традиционное решение — автогенераторная схема с трансформатором и выходным каскадом на биполярных транзисторах. Основной недостаток данных ЭПРА — отсутствие защиты от аномальных режимов работы. Отсутствие предохранителя и защиты от деактивированных ламп — норма для балластов этой группы. Штатный режим ра-

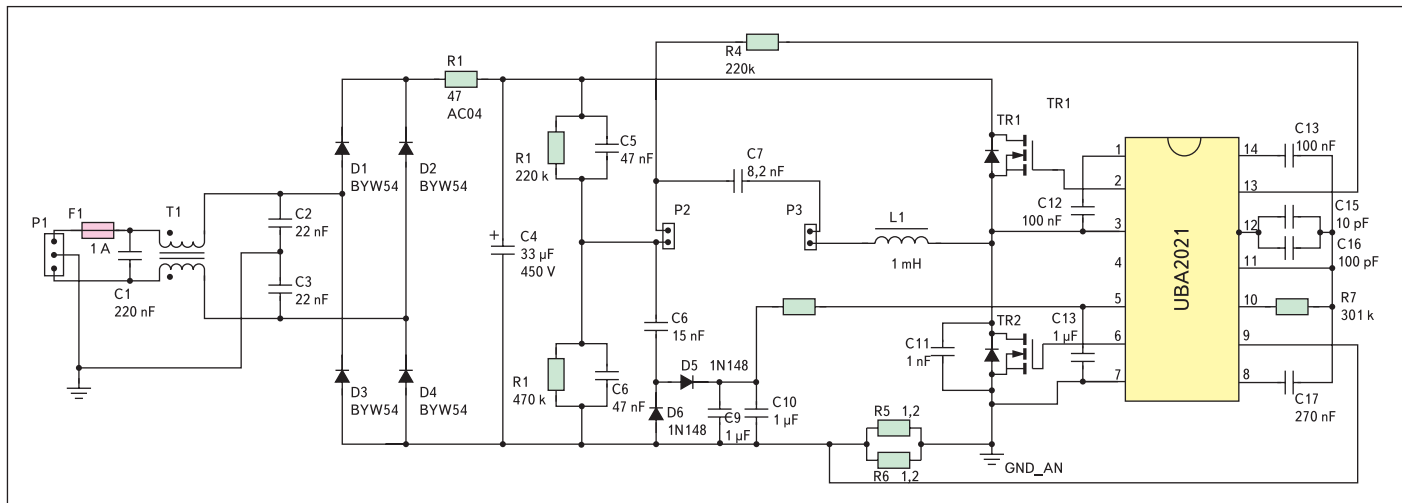


Рис. 5. Схема ЭПРА на основе микросхемы UBA2021 фирмы NXP

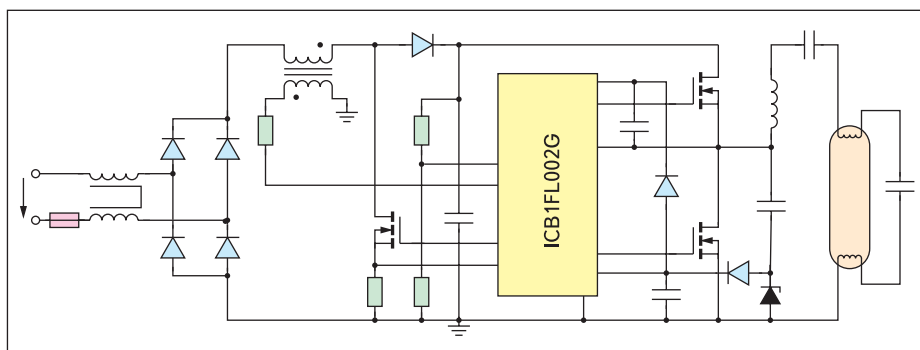


Рис. 6. Схема ЭПРА на основе микросхемы ICB1FL002G фирмы Infineon

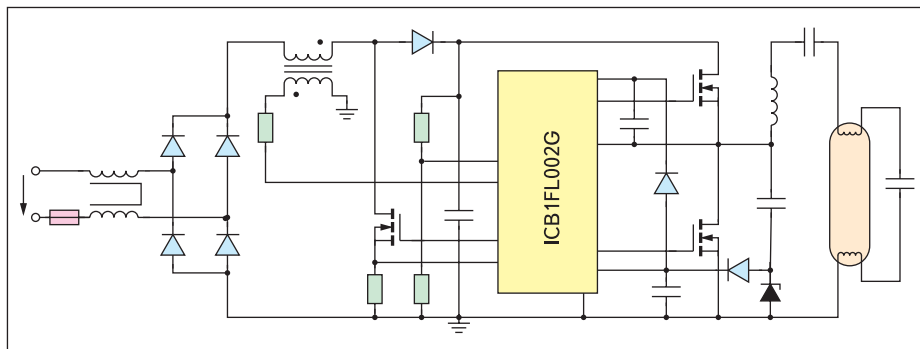


Рис. 7. Схема ЭПРА на основе IR2520D фирмы IR

боты этих ЭПРА тоже не всегда соответствуют основным требованиям. Это связано, прежде всего, с повышенной температурой транзисторов полумоста, составляющей примерно 100 °С, большими потерями в дросселях и низкими предельными температурными характеристиками конденсаторов. Точность установки частоты невысока, и велика вероятность возникновения емкостных токов. Кроме того, балласты этой группы, предназначенные для двух ламп, неустойчиво работают в одноламповом режиме, когда вторая лампа вышла из строя или не подключена, что тоже вызывает повышение рабочей температуры всего устройства. Все это приводит

к небольшому сроку работы балластов, который составляет не более 3000 часов. Производители таких ЭПРА, пытаясь удержаться в допустимом температурном режиме, занижают выходную мощность, в результате мощность 40-ваттной лампы при эксплуатации с таким балластом составляет не более 25 Вт. Некоторые балласты не имеют пассивного корректора коэффициента мощности, и данный коэффициент имеет значение 0,6–0,7, что сравнимо с электромагнитными балластами. Результатом является повышенный расход электроэнергии. Также одним из существенных недостатков ЭПРА этой группы является отсутствие входного фильтра и элементов,

осуществляющих предварительный разогрев катодов ламп. Производители таких балластов считают использование этих компонентов непоправимой роскошью. Таким образом, в основной своей массе, балласты этой группы могут называться ЭПРА с очень большими оговорками.

ЭПРА второй группы отличаются высоким качеством и не имеют указанных выше недостатков, но цена этих балластов не позволяет реализовывать их на российском рынке в массовом порядке.

Рассмотрим наиболее популярные микросхемы, которые применяются сегодня в качественных ЭПРА (рис. 5–7).

Основное отличие данных микросхем — рабочая частота. У микросхемы фирмы NXP она составляет 39 кГц, у Infineon — 40 кГц, а у IR может устанавливаться в диапазоне от 35 до 85 кГц.

Микросхема Infineon требует большого количества навесных элементов (на рис. 6 приведена упрощенная схема), но она снабжена стабилизатором напряжения. Основным плюсом микросхемы IR — возможность установки конструктором рабочей частоты. Однако при этом есть опасность попасть на резонансную частоту лампы, что приведет к сокращению срока службы. С этой точки зрения, оптимальной является микросхема NXP, отличающаяся достаточно низкой, жестко заданной рабочей частотой, что в результате приводит к относительно небольшим потерям. Кроме того, в отличие от микросхемы IR, микросхема NXP обеспечивает защиту от емкостного режима. Тем не менее нельзя не отметить основное преимущество IR — меньшие размеры и несколько меньшее количество навесных элементов.

Рассмотрим работу балласта на основе микросхемы UBA2021 более подробно.

Недорогой электронный балласт UBA2021 был разработан для управления люминесцентной лампой Philips TDL58W или ей подобных ламп.

Схема в целом представляет собой полумостовой инвертор, питающийся напряжением. Он рассчитан на работу с питающим напряжением 230 В с частотой 50–60 Гц. Ключевым компонентом схемы является микросхема UBA2021, предназначенная для управления компактными и трубчатыми люминесцентными лампами. Микросхема представляет собой высоковольтный драйвер, обладающий всеми необходимыми функциями для корректного управления предварительным нагревом, поджигом и горением лампы. Кроме того, микросхема обеспечивает сдвиг уровня и управление (включены драйвер верхнего плеча и компенсационная обратная связь) двумя мощными дискретными КМОП-транзисторами РНХ3N50Е, а также защиту от емкостного режима.

Основные преимущества — низкая стоимость и небольшое число периферийных элементов.

Работа лампы и ЭПРА делится на 3 фазы:

- Предварительный нагрев.
- Поджиг.
- Горение.

Рассмотрим все фазы поочередно.

На рис. 8 приведены осциллограммы тока и напряжения в лампе при использовании электронного балласта UBA2021.

### Включение

После включения выпрямленное питающее напряжение поступает на буферный конденсатор С4 через ограничитель пусковых бросков R1. Буферный конденсатор сглаживает пульсации напряжения (удвоенной частоты сети). Результат — высокое постоянное напряжение  $V_{hv}$ , которое подается на вход полумостового инвертора (силовые компоненты TR1, TR2, L1, C7, лампа, C5 и C6). При включении конденсаторы низкого напряжения C9, C10 и C13 заряжаются высоким напряжением через резисторы R2, R4, электрод лампы и вывод 13 микросхемы UBA2021, который внутренне соединен с выводом 5 во время фазы включения. Как только напряжение  $V_S$  на конденсаторе C13 достигает 5,5 В, происходит сброс микросхемы UBA2021.

После первоначального сброса транзистор TR2 открывается, а TR1 — закрывается. Благодаря этому, конденсатор компенсационной обратной связи C12 заряжается через петлю компенсационной обратной связи микросхемы UBA2021. Далее напряжение питания  $V_S$  растёт и, когда оно превышает 12 В, схема начинает генерировать колебания. Ток питания микросхемы устанавливается на уровне 14 мА. Система входит в фазу предварительного нагрева.

**Примечание.** Система снабжена функцией защиты от запуска при отсутствующей лампе. При отсутствии электрода цепь питания разрывается.

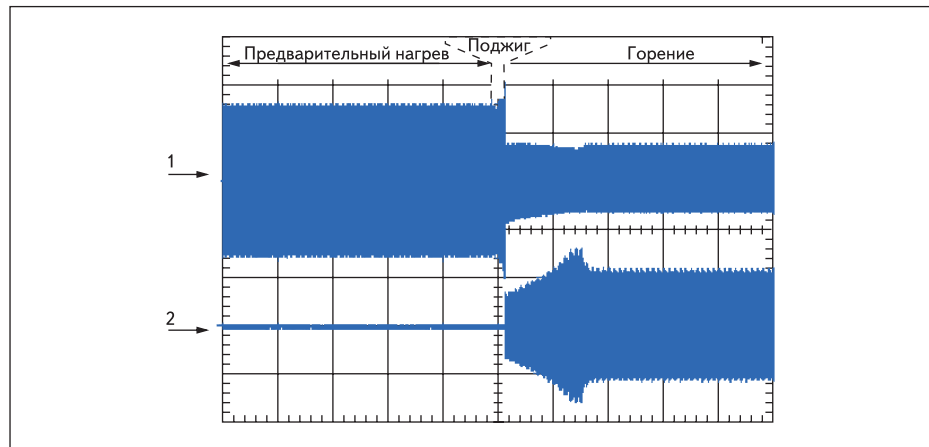


Рис. 8. Осциллограммы тока и напряжения в лампе

### Фаза предварительного нагрева

КМОП-транзисторы TR1 и TR2 открываются попеременно. В средней точке моста возникает переменное напряжение квадратной формы, изменяющееся от 0 до  $V_{hv}$ . Стартовая частота — 98 кГц. При этих условиях схема, образованная D5, D6 и C8 параллельно C10, может взять на себя функцию питания низким напряжением от цепи питания при запуске. В течение примерно 1,8 с (время предварительного нагрева  $T_{pre}$ , задаваемое конденсатором C17 и резистором R7) система находится в фазе предварительного нагрева, когда контролируется ток электрода лампы. Это позволяет обоим электродам лампы разогреваться в заранее определенном оптимальном режиме. Разогреваются эмитирующие электроды, и электроны в больших количествах испускаются в лампу. Теперь лампа поджигается при намного более низком напряжении, так что электрическая нагрузка на лампу и схему сводится к минимуму, что обеспечивает долгий срок службы системы.

После начала генерирования колебаний небольшой переменный ток начинает течь через среднюю точку полумоста через L1, C7 и электроды лампы. Частота постепенно снижается, а ток возрастает. Скорость уменьшения частоты задается конденсатором C14 и внутренним источником тока. Частота перестает снижаться, когда достигается определенное переменное напряжение на резисторах предварительного нагрева R5 и R6, примерно через 3 мс после включения. Теперь UBA2021 управляет переменным током через электроды, измеряя падение напряжения на резисторах R5 и R6.

Во время всего предварительного нагрева частота полумоста намного выше резонансной частоты L1 и C7 (55,6 кГц), так что напряжение на C7 является достаточно низким и не позволяет лампе зажечься. Если напряжение будет высоким, лампа загорится слишком рано, что приведет к почернению ее концов. Этот феномен называется холодным поджигом.

Номинал балластной спирали L1 определяется необходимым током лампы, емкостью C7 и рабочей частотой в фазе горения. Величина минимальной емкости C7 зависит от L1 и напряжения, при котором лампа остается не зажженной при заданном токе предварительного нагрева и минимальном напряжении сети. В результате конденсатор C7 емкостью 8,2 нФ обеспечивает наилучшие характеристики предварительного нагрева.

### Фаза поджига

По истечении времени предварительного нагрева UBA2021 снижает частоту полумоста до нижнего порога  $f_b$  (39 кГц). Скорость уменьшения частоты сейчас намного ниже, чем в фазе предварительного нагрева. Частота переключения приближается к резонансной частоте контура, образованного L1, C7 и электродами лампы, на которой сопротивление блокирующих конденсаторов для постоянного тока C5 и C6 довольно мало. В худшем случае напряжение зажигания лампы TDL58W при низкой температуре составляет 600 В. Комбинация балластной спирали L1 и конденсатора C7 выбирается таким образом, чтобы напряжение на лампе превышало данный верхний уровень. Напряжение зажигания лампы определяет максимальное значение C7 при заданном значении L1 исходя из нижней частоты  $f_b$  микросхемы UBA2021. Нижняя частота  $f_b$  задается резистором R7 и конденсаторами C15/C16. Максимальное время поджига составляет 1,7 с (15/16 от  $T_{pre}$ ) и задается C17 и R7. UBA2021 может переходить к фазе горения двумя способами:

- Если частота  $f_b$  не достигнута, переход осуществляется по истечении максимального времени поджига  $T_{ign}$ .
- По достижении частоты  $f_b$ .

### Фаза горения

В фазе горения частота обычно падает до  $f_b$  (39 кГц), которая используется в качестве

Таблица. Напряжение в сети и мощность в лампе

Напряжение сети, В	Мощность, потребляемая от сети, Вт	Мощность излучения лампы, Вт	КПД, %
200	52,0	47,6	92
210	53,5	48,9	91
220	54,4	49,6	91
230	55,0	50,0	91
240	55,4	50,2	91
250	55,6	50,3	91
260	55,8	50,3	90

номинальной рабочей частоты. Однако схема разработана таким образом, чтобы использовать упреждающее управление UBA2021, так что частота зависит от тока через вывод 13 микросхемы. Упреждающее управление активируется по достижении частоты  $f_b$ .

В фазе включения конденсаторы низкого напряжения C9, C10 и C13 заряжаются высоким напряжением  $V_{hv}$  через резисторы R2, R4, электрод лампы и вывод 13 микросхемы UBA2021, который внутренне соединен с выводом 5. В фазе горения вывод 13 соединяется с выводом 8. Теперь ток через резисторы R2 и R4 используется для получения информации для цепи упреждающего управления, чтобы управлять частотой переключения полумоста. Он пропорционален амплитуде выпрямленного напряжения сети  $V_{hv}$ . Пульсации сети (100–120 Гц) фильтруются конденсатором C17. В результате

мощность лампы остается более или менее постоянной при изменении напряжения сети в диапазоне 200–260 В. Параметры приведены в таблице.

На частотах выше 10 кГц лампу можно рассматривать как резистивную нагрузку. Эффективность лампы на частотах выше 10 кГц значительно возрастает по сравнению с лампами, работающими на частоте 50–60 Гц. Это означает, что лампа TDL58W, потребляющая 50 Вт на высокой частоте, дает столько же света, сколько лампа TDL58W, потребляющая 58 Вт на частоте 50–60 Гц.

### Защита

Для защиты схемы от перегрузок в микросхему UBA2021 встроена схема защиты от емкостного режима. Данная защита активна в фазах поджига и горения. Для этого UBA2021 анализирует условия переключения при нулевом напряжении при каждом цикле переключения полумоста. Это делается посредством отслеживания напряжения через R5 и R6. Если напряжение в момент включения TR2 ниже 20 мВ, то считается, что схема работает в емкостном режиме.

При обнаружении емкостного режима UBA2021 повышает частоту переключения. Скорость повышения частоты намного выше, чем скорость снижения во время предварительного нагрева и поджига. В результате, частота переключения поднимается выше ре-

зонансной частоты. Если емкостной режим больше не обнаруживается, частота опускается до частоты упреждающего управления.

Защита от удаления лампы включена в цепь низковольтного питания UBA2021. Если удалить лампу, переменное напряжение на C6 будет равно 0, так что низкое напряжение питания на UBA2021 исчезнет. Когда будет установлена новая лампа, схема заработает вновь. При этом нет необходимости выключать балластную схему.

Наконец, схема не запускается при отсутствующей лампе. В этой ситуации пусковой резистор R4 отключен от напряжения  $V_{hv}$ .

### Силовые компоненты

В схеме применяется конденсатор C4 серии ASH-ELB 043, специально разработанный для балластов электронных ламп, со сроком эксплуатации 15 000 часов при 85 °C, а также КМОП-транзисторы серии PHX3N50E. Благодаря использованию принципа переключения при нулевом напряжении потери на переключение двух КМОП-транзисторов сведены к минимуму. Потери мощности — это, главным образом, потери на проводимость. При этом устройства нагреваются в зависимости от термосопротивления  $R_{th}$  и сопротивления «сток–исток»  $R_{ds,on}$ . Длительность фаз предварительного нагрева и поджига довольно мала, так что выбор типа КМОП-транзистора определяется током в балластной катушке индуктивности в фазе горения. Транзистор PHX3N50E поставляется в корпусе SOT186A, его параметры  $V_{DSS} = 500$  В и  $R_{ds,on} < 3$  Ом.

Балластная катушка индуктивности L1 индуктивностью 1 мГн сконструирована для работы с пиковым током поджига до 2,5 А, так что систему можно использовать без защитного заземления. Применяется катушка с сердечником E25/13/7, материал сердечника 3C85.

Конденсатор C7 емкостью 8,2 пФ типа КР/ММКР 376 сконструирован для работы с высокой скоростью изменения напряжения ( $dV/dt$ ) при высокой частоте следования импульсов. Он рассчитан на напряжение «пик–пик» до 1700 В.

Итак, мы показали, что микросхема UBA2021 является оптимальным драйвером люминесцентных ламп. Она недорогая, требует небольшого количества внешних элементов, надежна и обеспечивает оптимальный режим работы люминесцентной лампы. ■

### Литература

1. [www.nxp.com](http://www.nxp.com)
2. [www.infineon.com](http://www.infineon.com)
3. [www.irf.com](http://www.irf.com)
4. [www.est-spb.ru](http://www.est-spb.ru)
5. [www.posvet.ru](http://www.posvet.ru)