

Особенности построения балластов

для ламп высокого давления (HID Lamp ballasts)

В последнее время наблюдается огромный интерес к ЭПРА (электронным пуско-регулирующим аппаратам) для ламп высокого давления (для «натриевых» ламп и для металл-галогенных) — HPS lamp ballasts (high pressure sodium lamp ballasts) и MH lamp ballasts (metal halogen lamp ballasts). Это в первую очередь связано с высокой удельной световой отдачей ламп — 130 люмен/Вт для «натриевой» лампы (что более чем в 5 раз выше, чем у лампы накаливания) и 90 люмен/Вт для металл-галогенной лампы.

Алексей Евстифеев

alexey.evstifeev@symmetron.ru

Достоинства применения ЭПРА по сравнению с электромагнитными балластами:

- высокий коэффициент мощности ($\cos\varphi = 0,98-0,99$);
- отсутствие низкочастотной пульсации светового потока;
- большой срок службы лампы (обусловлен возможностью контролировать мощность — «мягкий» старт и стабилизация мощности на лампе при старении) (рис. 1);
- возможность регулировки мощности (димминг);
- возможность соединять ЭПРА в интеллектуальные сети (по протоколам DALI, RS485, PLC и т. д.);
- высокий КПД — 95%;
- на порядок меньшие массо-габаритные параметры.

Недостатки: сложность применения в суровых климатических условиях (особо низкие температуры $-25...40^\circ\text{C}$, высокие температуры, высокая влажность).

Как видно, достоинств гораздо больше, притом что цена на ЭПРА и электромагнитные балласты примерно одинакова. Самая серьезная проблема возникает при применении ЭПРА для освещения улиц. Импе-

данс и допустимый ток пульсаций у силового фильтрующего электролитического конденсатора ухудшается при температуре -40°C в 12–13 раз. Конечно, после старта лампы конденсатор прогревается и входит в нормальный температурный режим, но в момент пуска ток через конденсатор превышает все возможные нормы, что впоследствии может привести к выходу его из строя. Такая проблема вызывает необходимость использования специальных низкотемпературных электролитических конденсаторов. Также опасна для ЭПРА высокая температура (применение пускового устройства в одном замкнутом корпусе с лампой) — поскольку температура внутри ЭПРА и так довольно высокая. При повышенных температурах уменьшается допустимый ток транзисторов (что заставляет применять более дорогие и мощные транзисторы), появляется необходимость применения электролитических конденсаторов с пределом в 105°C (у которых срок службы при повышении температуры сильно сокращается) и пленочных конденсаторов. Также оказывает большое влияние на долговечность ЭПРА работа в условиях высокой влажности, это заставляет герметизировать само устройство и покрывать печатную плату и компоненты специальным лаком. Как показала практика, в большинстве случаев причиной выхода из строя ЭПРА является электролитический конденсатор, поэтому необходимо к выбору силового электролитического конденсатора относиться с особым вниманием. Возможно разными способами избавиться от такого конденсатора — например, использовать питание от трехфазной сети (при выпрямлении — очень маленькие пульсации и достаточно иметь в качестве фильтра питания пленочный конденсатор небольшой емкости).

«Натриевые» лампы и металл-галогенные имеют различные свойства и применяются в различных областях. Так, например, «натриевые» лампы имеют желтый свет, в их излучении совершенно отсутствует синий цвет. Поэтому «натриевые» лампы нашли широкое применение в тепличном хозяйстве (как известно, данный участок спектра отвечает за рост растения вверх и рост плодов). «Натриевые» лампы ис-

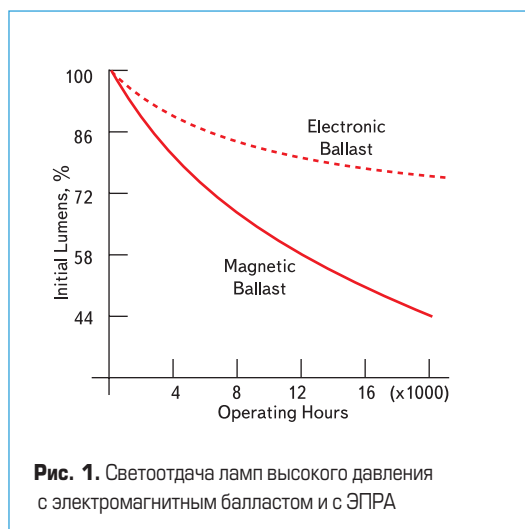
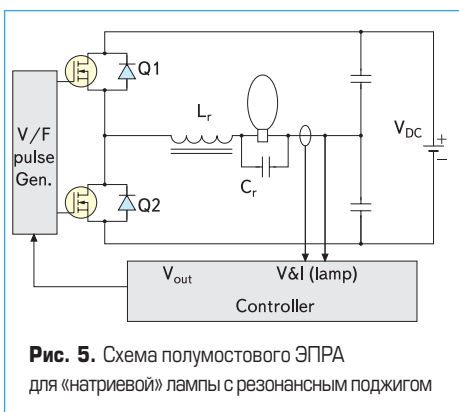
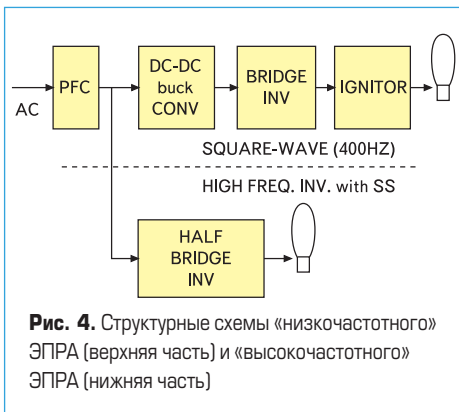
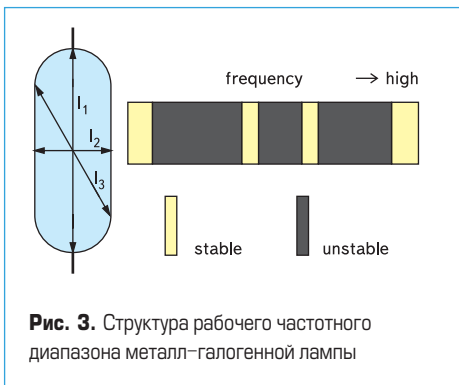
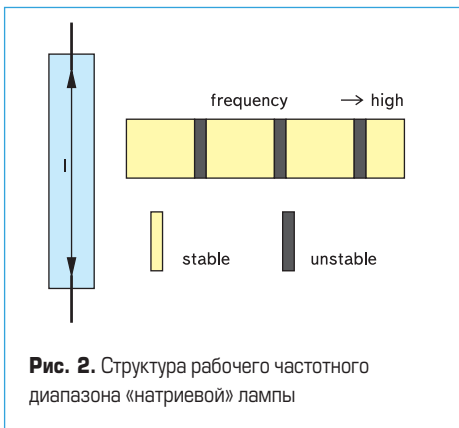
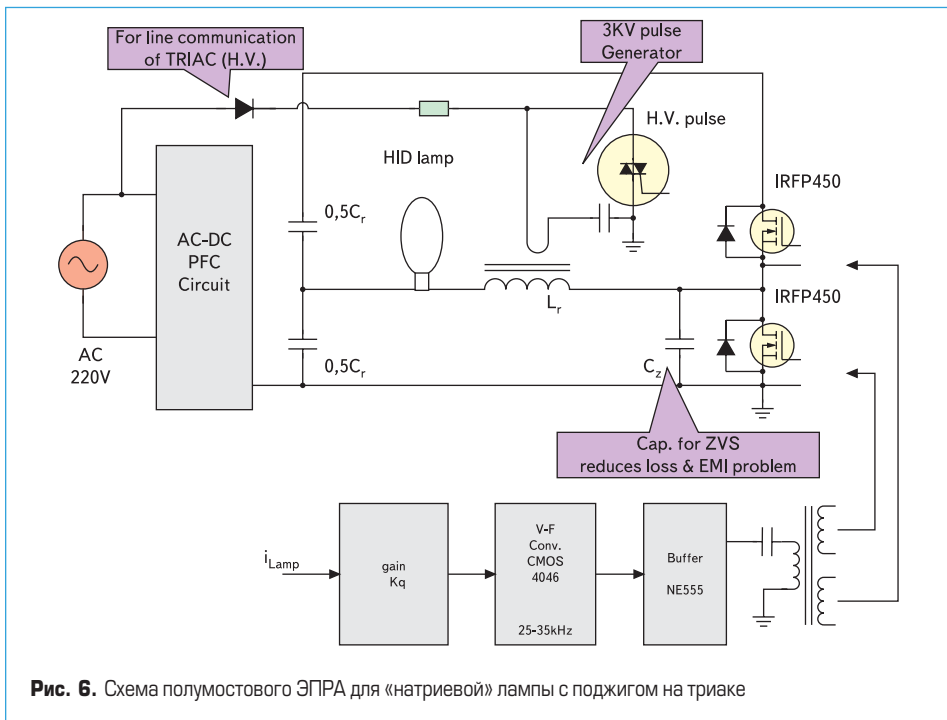


Рис. 1. Светоотдача ламп высокого давления с электромагнитным балластом и с ЭПРА



пользуются для освещения дорог, но их чередуют с металл-галогенными. Металл-галогенная лампа имеет белый естественный свет, близкий к солнечному. Они нашли широкое применение для освещения больших площадей и дорог.

Ввиду различной геометрии и прочих физических свойств лампы могут работать в различных частотных областях: на рис. 2 изображен частотный диапазон «натриевой» лампы, а на рис. 3 — частотный диапазон металл-га-



логенной. Как видно из диаграмм, обе лампы уверенно могут работать на низких частотах. На высоких частотах металл-галогенная лампа имеет очень узкие рабочие области, которые могут изменяться в зависимости от конфигурации колбы. По этой причине невозможно питать данный тип лампы током высокой частоты. Для «натриевой» лампы необходимо выбирать «окна», в которых лампа нормально функционирует, или питать ЭПРА с НЧ-выходом, что неоправданно дорого. В нестабильных областях у «натриевых» ламп появляется эффект акустического резонанса — в виде изгиба дуги (что ведет к локальному перегреву горелки), значительного снижения светового потока, механического «звона» (может привести к разрушению горелки).

Итак, рассмотрим структуру двух типов ЭПРА — «низкочастотного» и «высокочастотного» (рис. 4).

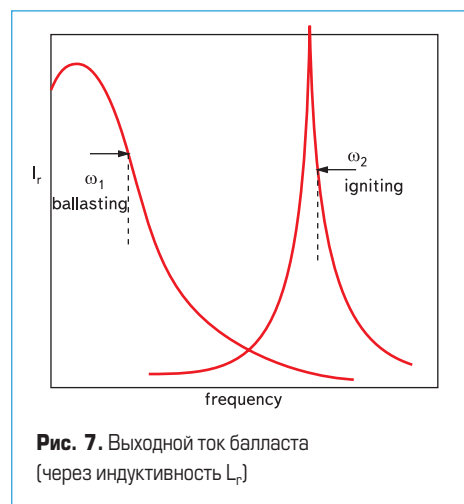
- «Низкочастотный» ЭПРА состоит:
- из корректора коэффициента мощности (PFC);
 - DC-DC понижающего (buck) преобразователя;
 - мостового инвертора (full bridge);
 - системы поджига лампы (ignitor).
- «Высокочастотный» ЭПРА имеет:
- корректор коэффициента мощности (PFC);
 - полумостовой инвертор (half bridge);
 - систему поджига.

Для обоих типов ламп необходима система поджига и пуска. Система поджига может работать по резонансному принципу (рис. 5) (данный метод имеет преимущество, поскольку позволяет получить мощный продолжительный высоковольтный импульс) и при помощи дополнительной обмотки и триака или разрядника (рис. 6). Для металл-галогенной лампы схема поджига строится по аналогии. Для поджига ламп необходим импульс от 2 до 4 кВ (в зависимости от мощности лампы) длительностью более 10 мкс.

Рассмотрим схему с резонансным поджигом (рис. 5). L_r и C_r образуют резонансный кон-

тур, стойка из пленочных конденсаторов по питанию образует делитель напряжения (их реактивное сопротивление должно быть намного меньше, чем рабочее сопротивление лампы). Резонансная частота контура рассчитывается как $f_r = 1/2\pi\sqrt{L_r C_r}$. Резонансная частота выбирается из имеющихся рабочих частотных «окон» и, как правило, значительно выше рабочей (рис. 7).

На рис. 7: ω_1 — рабочая частота, ω_2 — резонансная частота.



В момент запуска пуско-регулирующего устройства частота выше резонансной, затем она очень быстро снижается, на контуре возбуждается высокое напряжение, происходит пробой лампы, и частота снижается до рабочей. В момент пуска на резонансной частоте ток, протекающий через контур, имеет очень высокое значение (может быть, на один-два порядка выше номинального) и ограничен только активным сопротивлением контура, именно поэтому данная схема на практике не используется. Как правило, применяется схема, показанная на рис. 8, или ее модификация (рис. 9).

Рассмотрим работу схемы (рис. 8). В момент поджига работает контур L_r и C_r , C_p , резонан-

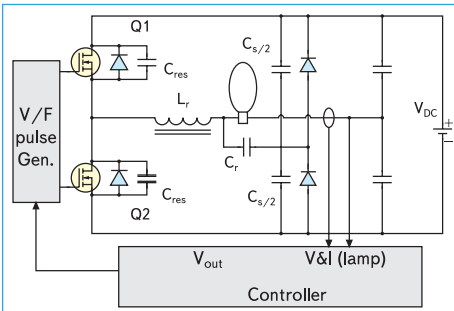


Рис. 8. Схема реализации резонансного поджига в ЭПРА для «натриевой» лампы с ограничением тока в контуре емкостным делителем

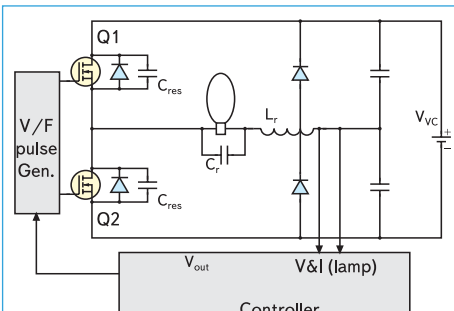


Рис. 9. Схема реализации резонансного поджига в ЭПРА для «натриевой» лампы с ограничением тока в контуре индуктивным делителем

свая частота контура равна $f_r = 1/2\pi\sqrt{L_r C_{ecv}}$, где:

$$C_{ecv} = \frac{C_r \times C_s}{C_r + C_s}$$

емкости C_r и C_s образуют делитель напряжения. В момент, когда напряжение на конденсаторах $C_{s/2}$ больше, чем напряжение питания $|u_{amplitude}| \geq U_{supply}$, диоды параллельно конденсаторам $C_{s/2}$ сбрасывают энергию в шину питания, таким образом, напряжение на конденсаторах $C_{s/2}$ никогда не может превысить напряжение питания, и общее напряжение в контуре (на емкостном делителе C_r и C_s) остается на уровне $U_{ign} \leq U_{supply} [(C_s + C_r) / C_r]$. Что самое важное, также ограничивается ток в контуре. Из выражения $(C_{ecv} U_{ign}^2) / 2 = (L_r I_{ign}^2) / 2$ получаем:

$$I_{ign} = U_{ign} \sqrt{C_{ecv} / L_r} \Rightarrow I_{ign} \leq U_{supply} \times \sqrt{[(C_s + C_r) / C_r] \sqrt{C_{ecv} / L_r}}$$

Схема, изображенная на рис. 9, работает аналогичным образом.

Также возможен резонансный поджиг на N-й гармонике, то есть ЭПРА работает на одной частоте (частота поджига и рабочая частота не отличаются). Поскольку форма напряжения на выходе полумоста прямоугольная, в спектре содержатся нечетные гармоники. В этом случае резонансный контур может быть настроен на третью гармонику, выброс тока при поджиге будет существенно ниже, чем при реализации поджига с «плавающей» частотой.

При проектировании системы поджига необходимо предусмотреть систему защиты от незажигания лампы и перезапуска, так как

при работе ЭПРА на «холостом» ходу через резонансный контур протекают большие токи, которые могут вывести аппарат из строя. Принципы работы поджига на триаке или на разряднике в этой статье рассматриваться не будут, эта тема очень хорошо освещена в [1, 2, 3].

После поджига лампа входит в рабочий режим — около 3–5 мин для «натриевой» лампы и 5–8 мин для металл-галогенной лампы. В рабочем режиме выходной каскад ВЧ-балласта работает в квазирезонансном (ZVS — zero voltage switching или переключения при нулевом напряжении) режиме. Резонансный контур образуют конденсаторы C_{res} и выходной дроссель L_r , собственная резонансная частота контура $f_r = 1 / (2\pi\sqrt{C_{res} L_r})$. Переключение при нуле напряжения обеспечивается при помощи «мертвого» времени (dead time) — $t_{dead} = 1/2 \times 1/f_r$. Условие работы в режиме резонанса $V_{supply} \leq I_{lamp} \sqrt{L_r / 2C_{res}}$. Квазирезонансный режим позволяет почти наполовину снизить динамические потери и уменьшить электромагнитные помехи.

В качестве ключей для «натриевого» балласта на небольших мощностях обычно используются быстрые полевые транзисторы с небольшим сопротивлением канала сток/исток. На больших же мощностях (свыше 600 Вт) очень интересно использовать IGBT-транзисторы Warp2 International Rectifier, такие как IRGB20B60PD1, IRGP20B60PD, IRGP35B60PD, IRGP50B60PD1, IRGP50B60PD. Данные транзисторы имеют очень высокие скорости переключения (6–20 нс, что сравнимо с очень хорошим быстрым MOSFET-транзистором), при больших токах явно виден выигрыш в статических потерях $P_{cond} = V_{ce(on)} I$ в противовес MOSFET ($P_{cond} = R_{ds} F$), цена на IGBT-транзисторы может быть чуть ли не в два раза ниже, чем цена на эквивалентный MOSFET-транзистор.

В качестве драйверов выходных транзисторов интересно использовать последнее поколение полумостовых и двоярных (верхний и нижний) драйверов G5 HVIC International Rectifier, таких как IRS2186(4) с выходным током ± 4 А, IRS2181(4), IRS2183(4), IRS2184(4). Драйверы имеют возможность работать от «логики», есть варианты драйверов с раздельной «землей», полумостовых с программируемым «мертвым» временем. Следует отметить особую важность качественной трассировки драйвера, это является определяющим при проектировании работоспособного устройства. Все правила трассировки подробно изложены в [8].

Рассмотрим далее, из чего состоит ЭПРА для «натриевой» лампы. Драйвером полумоста управляет высокочастотный генератор, который может быть реализован на микропроцессоре, а может быть и полностью аналоговым. Необходимость использования микропроцессора обусловлена необходимостью реализации ряда функций: перестройка частоты при поджиге, защита от незажигания лампы, повторный перезапуск ЭПРА в случае незажигания, стабилизация мощности на лампе, «общение» ЭПРА по информационной сети. Конечно, все эти функции можно было бы реализовать на аналоговой схемотехнике и использовать цифровую схему лишь для реализации управления по информационной сети,

но в таком случае схема получится довольно громоздкой. Со всеми вышеперечисленными функциями может справиться микропроцессор.

Отметим, что «натриевые» лампы имеют одну неприятную особенность — в процессе старения на лампе повышается напряжение (к примеру, для новой лампы в 600 Вт падение напряжения составляет 110 В, в процессе старения эта величина может вырасти до 160 В), что приводит к квадратичному росту мощности на ней и быстрому выходу ее из строя. Это обстоятельство требует введения цепи стабилизации мощности лампы. Стабилизируют мощность на лампе, как правило, за счет небольшого изменения рабочей частоты (в рамках рабочего частотного «окна»). Измерение мощности на лампе может быть как прямое, так и косвенное. При прямом измерении параллельно лампе устанавливается высоковольтный резистивный делитель, с которого снимается информация о напряжении на лампе. Информацию о токе снимают либо с резистора — датчика тока после корректора коэффициента мощности (PFC), либо с трансформатора тока, включенного последовательно с лампой (что может позволить реализовать функцию защиты от короткого замыкания). При косвенном измерении можно воспользоваться лишь информацией о токе, взятой с резистора — датчика тока после корректора коэффициента мощности (поскольку напряжение на выходе корректора коэффициента мощности стабильное и постоянное, мощность на лампе будет пропорциональна току, протекающему через шину питания). Эта реализация не очень «красивая» с точки зрения схемотехники, поскольку требует две отдельные «земли» и дополнительный резистор — датчик тока. Возможна и другая реализация косвенного метода. Информация о токе снимается с резистора — датчика тока корректора коэффициента мощности, и измеряется входное выпрямленное напряжение, два сигнала перемножаются в процессоре (получаем потребляемую мощность ЭПРА). Полученная информация корректируется заданной матрицей КПД устройства (при разном входном напряжении КПД корректора коэффициента мощности отличается, а также учитывается в матрице постоянная составляющая — мощность, необходимая для управления схемой). Данная реализация интересна тем, что не требует отдельной «земли» и позволяет использовать один бифункциональный резистор — датчик тока.

При применении в тепличном хозяйстве, а также при освещении улиц требуется димминг (регулировка мощности) лампы. В ЭПРА для «натриевых» ламп димминг осуществляется регулировкой напряжения питания на выходе корректора коэффициента мощности и регулировкой частоты полумоста в очень узких пределах. Большая работа по реализации димминга на основе такого принципа проделана В. Д. Поляковым (им получен рабочий макет с регулировкой от 50 до 100% выходной мощности). Очень интересен метод реализации димминга на основе широко-импульсной модуляции, кото-

рый позволяет реализовать более широкий диапазон регулировки, но его недостаток — невозможность перевести схему в квазирезонансный режим. Этот метод требует изучения. Интересна реализация [6] на основе схемы Phase-Shift.

Как показано на рис. 4, ЭПРА для «натриевой» лампы, и для металл-галогенной требует наличия в их составе корректора коэффициента мощности PFC, это продиктовано высокими требованиями к параметру $\cos\phi = 0,98-0,99$. До сих пор перед разработчиками встает вопрос: строить корректор в режиме прерывистого тока (Discontinuous Conduction Mode и Critical Conduction Mode) или в режиме неразрывного тока (Continuous Conduction Mode) в дросселе. Каждый из режимов имеет свои недостатки и преимущества. Режим неразрывных токов требует использовать быстрый диод (на карбиде кремния или Hyperfast), на котором возникают дополнительные потери на восстановление (если речь идет о Hyperfast), но в данном режиме значительно ниже токи через транзистор, на 30% ниже статические потери на транзисторе, достаточно маленький размах тока в дросселе, что позволяет применить более грубый лицендрат, меньшие пульсации на выходном электролитическом конденсаторе. Режим прерывистых токов позволяет применить в схеме более медленный диод, практически отсутствуют потери на его обратное восстановление, но импульсные токи через транзистор могут быть в несколько раз выше, конечно же, статические потери тоже выше, большой размах ВЧ-тока в дросселе, что требует применения более дорогого лицендрата, большие потери в сердечнике, большой уровень помех, большие пульсации на выходном конденсаторе. Выбор режима работы лежит полностью на разработчике, по сути, это вопрос оптимизации. Контроллер IR1150 International Rectifier предназначен для построения мощных PFC, работающих в режиме непрерывного тока в дросселе. Типовая схема включения представлена на рис. 10. Микросхема имеет ряд полезных функций: защита от пониженного и повышенного выходного напряжения, наличие встроенного драйвера с выходным током $\pm 1,5$ А. Имеется функциональный аналог микросхемы (с таким же принципом работы) ICE2PCS01 Infineon. Основное отличие IR1150 от своего аналога — два отдельных вывода: вход обратной связи по напряжению VFB и вход компаратора OVP (у ICE2PCS01 эти две функции объединены на один вывод). Такое разделение дает инженеру большую свободу при трассировке печатной платы. Компаратор очень чувствителен к паразитным колебаниям (при паразитных выбросах в большую или меньшую сторону происходит отключение микросхемы, срабатывает защита от повышенного или пониженного напряжения, а при появлении на входе компаратора отрицательного относительно «земли» напряжения микросхема полностью выходит из строя). Данный эффект сильно выражен в микросхеме ICE2PCS01 Infineon, это требует тщательной трассировки схемы. В целом, по принципу работы микросхемы написано очень много статей, на сайте

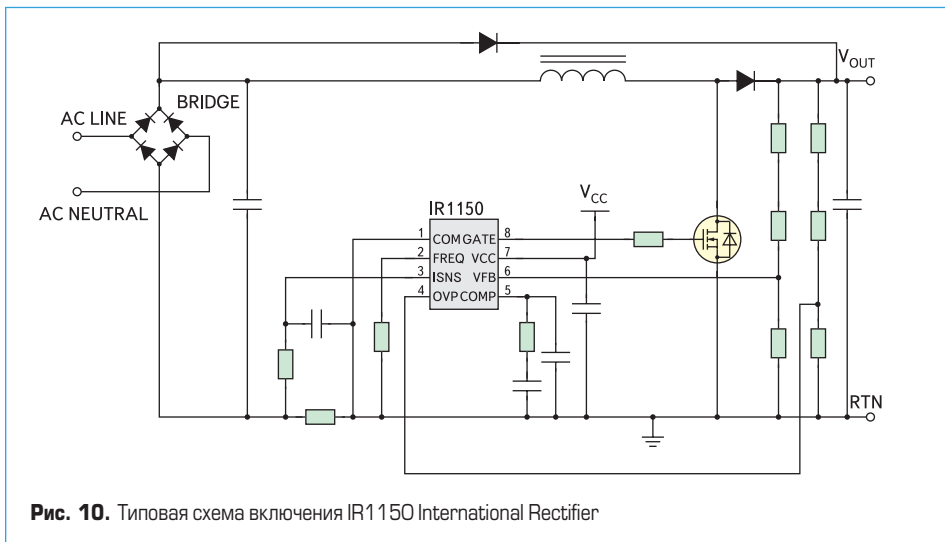


Рис. 10. Типовая схема включения IR1150 International Rectifier

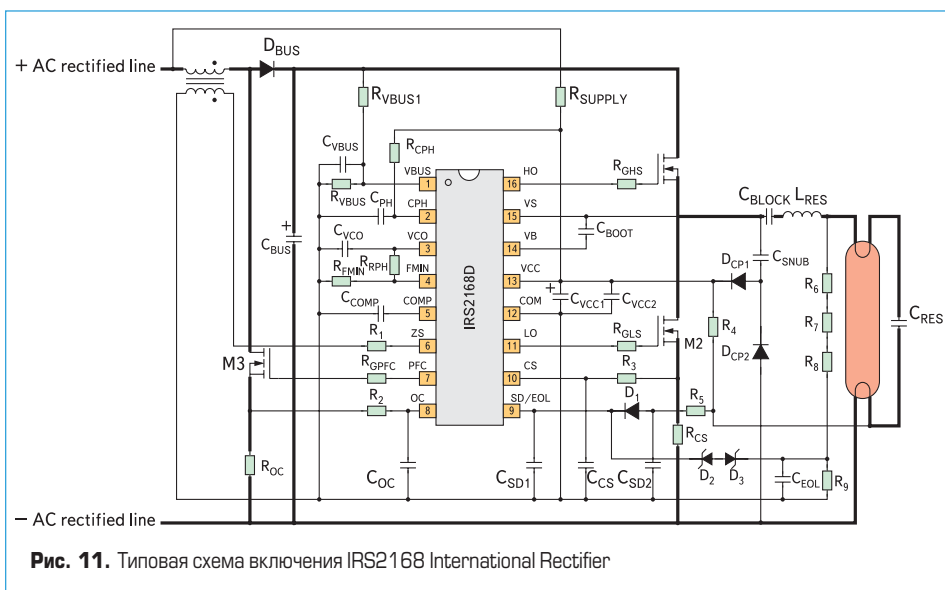


Рис. 11. Типовая схема включения IRS2168 International Rectifier

производителя есть интерактивная программа для моделирования, приведены рекомендации по применению — у разработчика не должно возникнуть вопросов при разработке изделия. Еще одна серия микросхем IRS2166 и IRS2168 International Rectifier, изначально предназначенных для применения в балластах для флуоресцентных ламп, может быть с успехом применена в балластах для «натриевой» лампы. На рис. 11 представлена типовая схема включения микросхемы IRS2168. Как видно на рисунке, микросхема имеет встроенный генератор, драйвер управления полумостом, выход на корректор коэффициента мощности, микросхема имеет все возможные защиты, функцию стабилизации мощности на лампе. Поджиг может быть реализован как резонансным методом, так и на триаке. Следует отметить, что драйверы управления транзисторами довольно слабые — $\pm 0,5$ А, однако это позволяет строить ЭПРА до 250 Вт без применения дополнительных каскадов. В случае недостаточности этого тока выходы микросхемы можно усилить, добавив каскад на паре N и P канальных транзисторов. В заключение статьи рассмотрим состав ЭПРА для металл-галогенной лампы (см. рис. 4). Как видно, в состав входит DC/DC преобразователь, который преобразует напряжение корректора (400 В) в напряжение, требуемое для

лампы — около 100 В. Как правило, данный преобразователь строится по понижающей топологии (Buck). Схема может работать как в режиме прерывистых токов, так и в режиме неразрывных токов, с синхронным выпрямлением или без него. Собственно посредством этого DC/DC-преобразователя и происходит стабилизация мощности на лампе и димминг. В качестве контроллера может быть выбран практически любой ШИМ-контроллер, драйвер можно использовать из числа тех, что указаны выше. Особое внимание при проектировании нужно уделить обратной связи, поскольку при довольно медленной петле может возникнуть автоколебательный процесс и система выйдет из стабильного состояния. Почерпнуть информацию по этой теме можно в [7]. В качестве выходного мостового низкочастотного драйвера (400 Гц меандр) можно использовать драйвер IRS2453 International Rectifier, типовая схема включения приведена на рис. 12. Микросхема имеет два встроенных полумостовых драйвера, работающих синхронно в мостовой схеме, встроенные бустерные транзисторы для питания верхних драйверов, опорный программируемый генератор, схему, обеспечивающую «мертвое» время. В случае использования импульсного поджига на триаке в качестве выходных транзис-

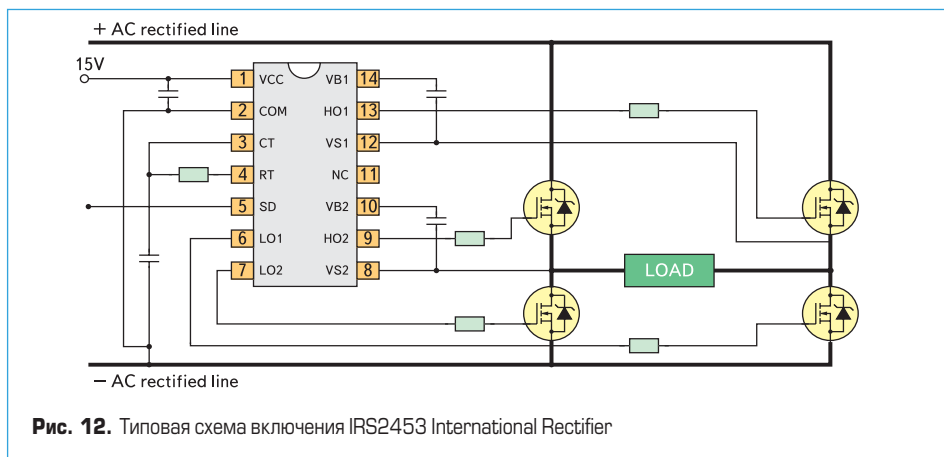


Рис. 12. Типовая схема включения IRS2453 International Rectifier

торов целесообразно применять недорогие медленные низковольтные (250–300 В) IGBT-транзисторы IRG14090PBF, IRG4P254S, IRGP4086PBF, IRGP4050, IRGP4072DPBF International Rectifier или MOSFET-транзисторы с низким сопротивлением сток/исток. В случае использования резонансного поджига в схеме необходимо реализовать систему перестройки частоты, усилить выходные драйверы (собственные обеспечивают 180–260 мА, что достаточно только для работы на низкой частоте).

Как видим, схема низкочастотного балласта для металл-галогенной лампы содержит гораздо больше электронных компонентов, и это приводит к серьезному ее удорожанию. Одним из перспективных методов построения балластов для металл-галогенной лампы является ВЧ-метод на основе ШИМ-модуляции, который аналогично применяется в усилителях

класса D. То есть структура данного балласта подобна схеме, применяемой в балласте для «натриевой» лампы. Но в качестве генератора в полумосте используется ШИМ-контроллер. При помощи ШИМ-модуляции можно получить сигнал на выходе фильтра нужной частоты, формы и амплитуды. Аналогичная реализация приведена в [4].

Тема построения ЭПРА для ламп высокого давления уже давно и активно развивается в странах Юго-Восточной Азии. Написано много статей, защищено большое количество кандидатских и докторских диссертаций. Однако остается много неизученных вопросов, много всевозможных перспективных схемных решений, например [4]. Современные требования к энергосбережению требуют применения решений с высокой эффективностью (КПД), высокой световой отдачей (люмен/Вт). ЭПРА позволяют реализовать димминг, соединять

приборы в локальную сеть, где будет передаваться информация о неработоспособности, старении лампы, информация о необходимом уровне освещенности. Эта тема, скорее всего, будет очень популярна во всем мире в течение ближайших десяти лет.

Литература

1. Sam-Ben-Yaakov, Gulko M. Design and Performance of an Electronic Ballast for High Pressure Sodium (HPS) Lamp. To be presented at APEC95.
2. Seung-Hee Lee, Chi-Hwan Lee. A novel power controller for electronic ballast for HID lamp. Power electronics. May 2003.
3. Chi-Hwan Lee, Seung-Hee Lee. Control of resonant electronic ballast for HPS lamp.
4. Geraldo C. R. Sincero, Andre S Franciosi, Arnaldo J. Perin. A 250W high pressure sodium lamp high power factor electronic ballast using an AC Chopper.
5. Chi-Hwan Lee. Electronic Ballast for 400 W Metal Halide Lamp.
6. Christian Branas, Francisco J. Azcondo, Rosario Casanueva, Salvador Bracho. Phase-controlled Quadruple LC Resonant Inverter to drive 600W HPS Lamps.
7. Поляков В. Д., Пузанов В. А., Смирнов Е. М., Обжерин Е. А. Особенности анализа и расчета современных систем электропитания разрядных ламп высокого давления.
8. Силовые полупроводниковые приборы. Книга по применению / Пер. с англ. Под ред. В. В. Токарева. Воронеж, 1995.