

Специфика расчета электронных балластов

разрядных ламп высокого давления

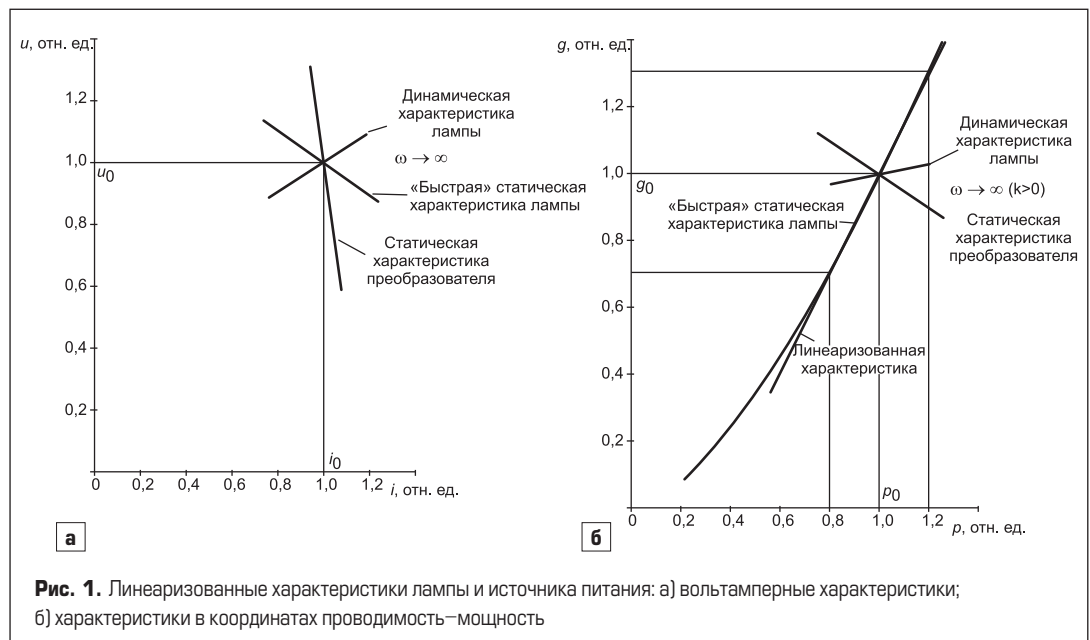
Валерий Поляков, к. т. н.

promel2000@yandex.ru

Источник питания разрядных ламп высокого давления имеет достаточно сложную структуру [1, 2]. Однако определяющим звеном, обеспечивающим стабилизацию и регулирование электрического режима лампы, является импульсный понижающий преобразователь. Сглаживание тока обеспечивается НЧ-фильтром, структура которого зависит от схемного решения силовой части источника. В результате получается система, включающая импульсный преобразователь, НЧ-фильтр и нелинейную инерционную нагрузку — разрядную лампу. Поэтому анализ системы и выбор параметров источника питания следует вести с учетом электрических характеристик дугового разряда лампы.

Дуговой разряд представляет собой резистивную инерционную нагрузку и характеризуется комплексом статических и динамических характеристик. Каждая статическая характеристика соответствует своей температуре горелки. При пуске и выходе на рабочий режим характеристики лампы меняются в соответствии с температурой горелки. Динамическая характеристика соответствует постоянству температуры плазмы. Инерционные

свойства определяются постоянной времени, которая также является функцией температур плазмы и горелки. Для натриевых и металлогалогенных ламп постоянная времени составляет десятки или сотни микросекунд [3–5]. Характерный вид линеаризованной статической и динамической вольт-амперной характеристики (ВАХ) лампы и статической ВАХ импульсного преобразователя приведен на рис. 1а. На рис. 1б те же характеристики даны в координатах проводимость–мощность. Измерение статических характеристик и постоянной времени следует проводить согласно методам, изложенным в [3, 4]. Снятие характеристик в области рабочей точки можно произвести путем наложения пульсирующего тока на стационарный режим, определяемый постоянным током. Динамическая характеристика соответствует периоду, значительно меньшему постоянной времени разряда. При измерении статической характеристики период кривой тока должен значительно превышать постоянную времени разряда, но быть намного меньше постоянной времени горелки. Существует и другой способ — тестирование разряда скачкообразным изменением тока [3, 4].



Проводимость (g) и, соответственно, сопротивление (r) разряда является функцией мгновенных значений мощности p (напряжения или тока) и потерь мощности p_n . Рассчитываемая проводимость представляется как функция:

$$g = 1/r = F(p, p_n). \quad (1)$$

Изменение потерь мощности определяется уравнением динамического баланса:

$$\tau_D(dp_n/dt) = p - p_n. \quad (2)$$

Мощность p_n равна суммарным текущим потерям мощности в плазме положительного столба. Инерционность характеризуется постоянной времени (τ_D), которая определяется наиболее медленными тепловыми процессами в плазме разряда. Мгновенная мощность и проводимость связаны известными зависимостями с мгновенными значениями тока лампы (i_D) и напряжения на лампе (u_D):

$$p = u_D i_D, \quad (3)$$

$$g = i_D / u_D. \quad (4)$$

Линейную аппроксимацию зависимости $g_D = F(p, p_n)$ в области рабочей точки можно записать в виде:

$$g = g_0 + k_2^{-1}(p_n - p_{n0}) + k(p - p_{n0}), \quad (5)$$

где $k_2^{-1} = dg/dp|_{p=p_n=p_0}$ — коэффициент, определяющий наклон статической характеристики лампы

$$g = g_0 + k_2^{-1}(p - p_0)|_{p=p_n} \quad (6)$$

в точке установившегося режима;

$k = dg/dp|_{p=p_0}$ — коэффициент, определяющий наклон динамической характеристики лампы

$$g = g_0 + k(p - p_{n0})|_{p_n=p_0} \quad (7)$$

в точке установившегося режима.

При питании разряда прямоугольным током низкой частоты можно считать, что на «полке» тока реализуется квазистационарный режим. В момент изменения полярности тока возникает возмущающее воздействие. Возникающий при этом переходный режим зависит от параметров как источника питания, так и характеристик разряда.

Оценку устойчивости и динамических свойств системы «источник питания-разряд» в общем случае следует проводить с использованием математической модели [2-6] (рис. 2).

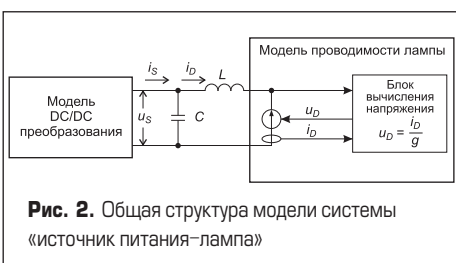


Рис. 2. Общая структура модели системы «источник питания-лампа»

Модель лампы на основе дифференциальных и алгебраических уравнений (1-7) должна быть дополнена математической моделью источника питания. Алгоритм работы модели следующий: в начале каждого расчетного цикла по текущим значениям тока $i_D(t)$ и проводимости $g(t)$ лампы рассчитывают напряжение $u_D(t)$. Затем определяют потребляемую мощность $p(t)$ по формуле (3). Рассчитывают мощность потерь $p_n(t)$ по уравнению (2), записанному в интегральном виде, и вычисляют проводимость по формуле (1). Далее переходят к очередному расчетному циклу для времени $t = t + \Delta t$.

Линеаризация уравнения (2) в окрестности рабочей точки позволяет записать выражение для расчета дифференциального сопротивления дуги в следующем виде:

$$r_{D\text{diff}}^* = \frac{\Delta u_D^*}{\Delta i_D^*} =$$

$$= \frac{\left[\tau_{D0} \frac{1}{\Delta i_D^*} \frac{d \Delta i_D^*}{dt} (1 - k^*) + (k_2^* - 1) \right]}{\left[\tau_{D0} \frac{1}{\Delta u_D^*} \frac{d \Delta u_D^*}{dt} (1 + k^*) + (k_2^* + 1) \right]}, \quad (8)$$

где $\Delta u_D^* = (u_D - u_0)/u_0$, $\Delta i_D^* = (i_D - i_0)/i_0$ — свободные составляющие напряжения и тока дуги, $\tau_{D0} = \tau_D k_2 / u_0^2$ — постоянная времени проводимости разряда, $k_2^* = k_2 / u_0^2$, $k^* = k g_0 / p_0$.

Формула (8) дает возможность традиционными методами произвести расчет устойчивости и динамических свойств системы. Например, если использовать усредненную модель импульсного преобразователя, можно рассчитать такие параметры, как частота модуляции, емкость и индуктивность выходного фильтра, коэффициент усиления и параметры цепи коррекции усилителя ошибки.

В простейшем случае источник питания в области рабочей точки характеризуется дифференциальным сопротивлением:

$$r_{S\text{diff}}^* = \Delta u_S^* / \Delta i_S^* = (k_3^* - 1) / (k_3^* + 1), \quad (9)$$

где $\Delta u_S^* = (u_S - u_0)/u_0$, $\Delta i_S^* = (i_S - i_0)/i_0$ — свободные составляющие напряжения и тока импульсного преобразователя, $k_3^* = k_3 / u_0^2$ — коэффициент, определяющий наклон статической характеристики источника питания в координатах мощность-проводимость.

Это упрощение допустимо, если импульсный преобразователь, включая систему управления, является квазиинерционным. То есть при работе на неинерционную нагрузку (пример — линейный резистор) и при ступенчатом ее изменении новый квазистационарный режим устанавливается за один период модуляции. Второе условие — период модуляции $T = 1/f \ll \tau_D$. На самом деле достаточно, чтобы выполнялось условие $f > 3,4 \tau_D$ [7]. Примером могут служить

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \tau_{L0} \tau_{C0} \tau_{D0} (1 - k_3^*) \\ a_1 &= \tau_{L0} \tau_{C0} (1 - k_3^*) (1 + k_2^*) + \tau_{D0} \left[\tau_{L0} (1 + k_3^*) (1 + k^*) + \tau_{C0} (1 - k_3^*) (1 - k^*) \right] \\ a_2 &= 2(1 - k^* k_3^*) \tau_{D0} + \tau_{L0} (1 + k_3^*) (1 + k_2^*) + \tau_{C0} (1 - k_3^*) (k_2^* - 1) \\ a_3 &= 2(k_2^* - k_3^*) \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

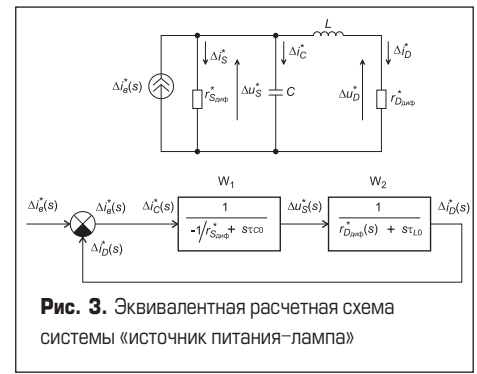


Рис. 3. Эквивалентная расчетная схема системы «источник питания-лампа»

импульсные источники питания с системой позиционного слежения за выходным током.

Эквивалентная расчетная и структурная схемы системы для данного случая приведены на рис. 3.

Передаточная функция системы определяется выражением

$$W = \frac{W_1 W_2}{1 + W_1 W_2} = \frac{1}{1 + \left(s \tau_{L0} + r_{D\text{diff}}^*(s) \right) \times \left(s \tau_{C0} - \frac{1}{r_{S\text{diff}}^*} \right)}, \quad (10)$$

где $\tau_{C0} = C/g_0$, $\tau_{L0} = L/g_0$.

Приравняв знаменатель передаточной функции (10) к нулю, получим линейное характеристическое уравнение третьего порядка:

$$a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0. \quad (11)$$

Коэффициенты уравнения (11) функционально связаны с параметрами источника питания и лампы и определяются следующими формулами (12).

Для обеспечения статической устойчивости системы согласно критерию Гурвица необходимо и достаточно выполнения следующих соотношений для коэффициентов характеристического уравнения:

$$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, \Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0. \quad (13)$$

Условие $a_0 > 0$ выполняется всегда. Коэффициенты a_1 и a_3 имеют положительный знак для всех $0 < k_2^* < 1$ и $k_2^* > k_3^* > -1$; $r_{D\text{diff}}^* > r_{S\text{diff}}^* > -\infty$.

При известных параметрах лампы (τ_{D0} , k_2^* , k^*) и коэффициенте k_3^* , определяющем наклон статической характеристики источника питания, устойчивость системы возможна при значениях параметров (τ_{L0} , τ_{C0}), которые находятся путем решения системы неравенств:

$$a_2 > 0, a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0. \quad (14)$$

Графическое решение (13) представлено на рис. 4.

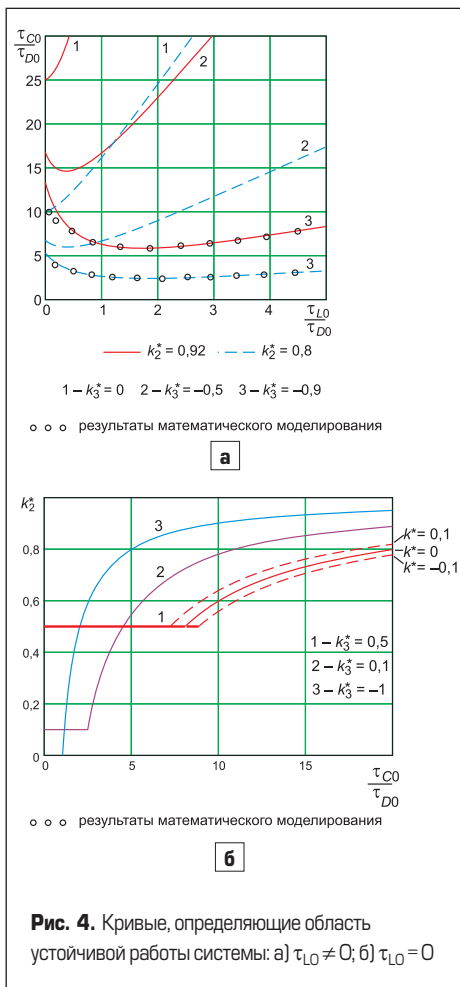


Рис. 4. Кривые, определяющие область устойчивой работы системы: а) $\tau_{L0} \neq 0$; б) $\tau_{L0} = 0$

Система устойчива для области параметров, лежащих выше граничной кривой (рис. 4 б) и ниже граничной кривой (рис. 4 а). Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Система устойчива для всех $k_2^* > 1$, то есть для всех растущих ВАХ лампы.
2. Устойчивость системы падает с ростом емкости фильтра и растет с увеличением постоянной времени разряда τ_{D0} .

3. При отсутствии емкости фильтра (индуктивный фильтр) единственным условием устойчивости является $k_2^* > k_3^*$ ($r_{Sдиф}^* < r_{Dдиф}^*$).
4. При $k_2^* > k_3^*$ зона устойчивых состояний увеличивается с ростом значений коэффициента k_3^* . Это означает, что при наличии емкости фильтра устойчивость повышается для более пологих ВАХ импульсного преобразователя.
5. При $k_3^* > 0$ устойчивость увеличивается с ростом постоянной времени τ_{L0} .
6. Для значений $-1 < k_3^* < 0$ наблюдается сначала уменьшение, а затем увеличение области устойчивой работы с ростом параметра τ_{L0} . Минимум смещается к началу координат при повышении значения коэффициента k_3^* .
7. Коэффициент k^* , определяющий наклон динамической характеристики лампы, влияет на устойчивость работы. Это воздействие зависит от значения и знака коэффициента k_3^* . При $k^* > 0$ устойчивость несколько повышается для $k_3^* < 0$ и снижается для $k_3^* > 0$.

Оценку динамических свойств системы можно провести по корням характеристического уравнения, используя решение Кардано. Практический интерес представляет случай, когда индуктивность LC-фильтра невелика, что соответствует условию $\tau_{C0} \gg \tau_{L0} \ll \tau_{D0}$. Это позволяет понизить порядок характеристического уравнения, полагая $\tau_{L0} \rightarrow 0$, и получить простые аналитические выражения для параметров системы, от которых зависит устойчивость и характер переходного процесса [7]. Неравенство, определяющее зону устойчивой работы, может быть записано в виде:

$$\tau_{C0} < \frac{2\tau_{D0}(1-k^*k_3^*)}{(1-k_3^*)(1-k_2^*)} \quad (15)$$

Характер переходного процесса и быстродействие можно определить по коэффициенту затухания $\xi = a_2/2\sqrt{a_1a_3}$. В зависимости от его значения в системе может иметь место аperiodический затухающий процесс ($\xi > 1$) и затухающие колебания $0 < \xi < 1$. При $\xi \rightarrow 0$, что

соответствует граничным условиям устойчивости, в системе возникают слабозатухающие колебания с частотой

$$\omega = \sqrt{\frac{2(k_2^* - k_3^*)}{\tau_{D0}\tau_{C0}(1-k_3^*)(1-k^*)}} \quad (16)$$

Для аperiodического режима справедливо неравенство $a_2 > 2\sqrt{a_1a_3}$, которое в развернутом виде запишется так:

$$\tau_{D0}(1-k^*k_3^*) + (1-k_3^*)(k_2^* - 1)(\tau_{C0}/2) > 2\sqrt{(\tau_{C0}\tau_{D0}/2)(1-k)(1-k_3^*)(k_2^* - k_3^*)} \quad (17)$$

Выражение (16) при известных электрических характеристиках разряда и преобразователя позволяет ориентировочно определить постоянную времени τ_{C0} и, соответственно, емкость конденсатора фильтра, при которой процессы в системе имеют аperiodический характер.

Методика расчета источника питания

В качестве примера приведем методику расчета параметров электронного балласта для металлогалогенной лампы CDM-T 70W. Схема выполнена на базе понижающего импульсного преобразователя и НЧ-инвертора [9] (см. рис.5).

1. Производим измерение параметров статической и динамической характеристик лампы ($p_0, u_0, g_0, k_2^*, k^*$) и постоянной времени τ_{D0} . Наихудший случай соответствует максимальной мощности лампы, где k_2^* имеет минимальное значение.
2. Рассчитываем постоянную времени τ_{C0} по формуле (15), определяющей условие устойчивости системы. Значение целесообразно выбирать с запасом, то есть в 2 и более раз меньше рассчитанного. Поскольку реализуется характеристика источника тока, то $r_{Sдиф}^* \rightarrow \infty, k_3^* = -1$. По выбранному τ_{C0} рассчитывают емкость фильтра $C = \tau_{C0}g_0$.
3. При выборе L (индуктивность рассеяния трансформатора зажигания) целесообразно ограничить время (t_ϕ) смены полярности тока лампы на уровне, не превышающем постоянную времени проводимости разряда $t_\phi < \tau_{D0}$. Ток в лампе изменяется по известному экспоненциальному закону. Если считать процесс перехода завершённым при достижении током уровня, равного 0,9 от своего установившегося значения, то получим простую формулу $L < \tau_{D0}/2,95g_0$. Проверяем условие $\tau_{L0} < \tau_{C0}$.
4. Определяем частоту модуляции импульсного преобразователя. Как показано в [7], достаточным является выполнение неравенства $f > 3,4/\tau_{D0}$.
5. Рассчитываем индуктивность импульсного преобразователя:
 $L_{ИП} = (U(1-D)D)/2I_{Lamp}f$, где $D = U_{Lamp}/U$, U — напряжение на входе импульсного преобразователя (стабилизированное напряжение на выходе корректора коэффициента мощности), U_{Lamp} — напряжение на лампе, I_{Lamp} — ток лампы.

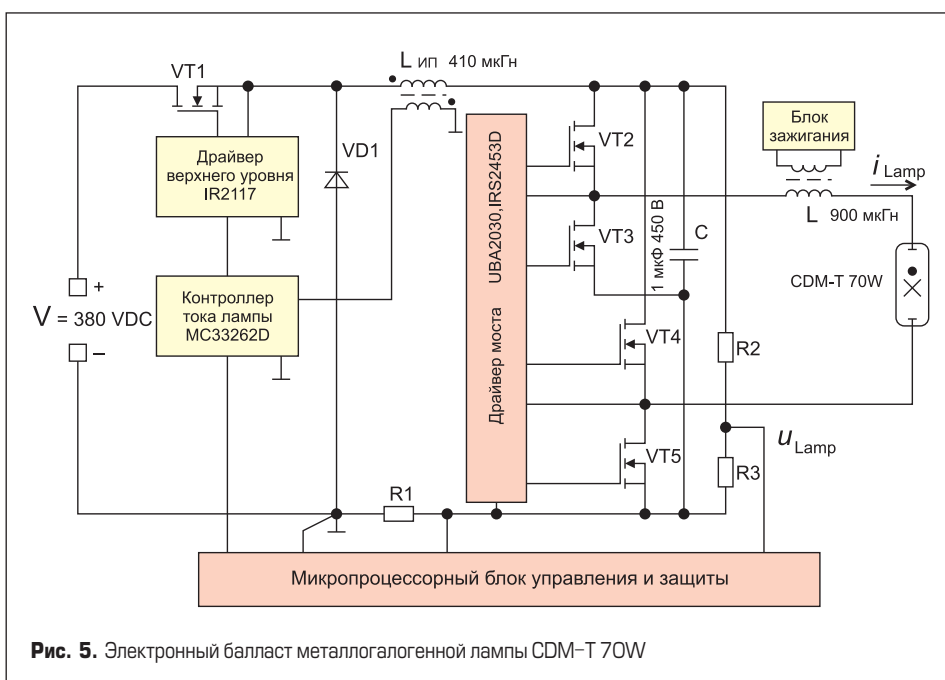


Рис. 5. Электронный балласт металлогалогенной лампы CDM-T 70W

Таблица 1. Электрические параметры лампы

Наименование параметра	Значение
Мощность лампы, Вт	$P_{Lamp} = P_0 = 70$
Напряжение на лампе, В	$U_{Lamp} = u_0 = 85$
Ток лампы, А	$I_{Lamp} = P_{Lamp}/U_{Lamp} = 0,82$
Проводимость лампы	$G_{Lamp} = g_0 = 0,0097$
Динамическое сопротивление, 1/Ом	$r_{Ддин} = R_{Lamp} = 103 \text{ Ом}; r_{Ддин}^* = r_{Ддин}g_0 = 1$
Коэффициент k^*	$k^* = (1 - r_{Ддин}^*) / (1 + r_{Ддин}^*) = 0$
Дифференциальное сопротивление, Ом	$r_{Ддиф} = -9,65 \text{ Ом}; (r_{Ддиф}^* = r_{Ддиф}g_0 = -0,094)$
Коэффициент k_2^*	$k_2^* = (1 + r_{Ддиф}^*) / (1 - r_{Ддиф}^*) = 0,83$
Постоянная времени τ_{D0} , мкс	$\tau_{D0} = \tau_D k_2^* = 85$

Таблица 2. Параметры электронного балласта

Параметры источника питания	Расчетная формула	Значение
Коэффициент k_3^*	$k_3^* = (1 + r_{Сдиф}^*) / (1 - r_{Сдиф}^*)$	-1
Емкость конденсатора фильтра С, мкФ	$C < \{2g_0\tau_{D0}(1 - k^*k_3^*)\} / \{(1 - k_3^*)(1 - k_2^*)\}$	$4,85 > C = 1$
Индуктивность трансформатора зажигания, мГн	$L < \tau_{D0} / 2,95g_0$	$3,5 < L = 0,9$
Частота модуляции, кГц	$f > 3,4 / \tau_{D0}$	$40 < f = 100$
Индуктивность дросселя импульсного преобразователя, мкГн	$L_{ИП} = (U(1 - D)) / (2I_{Lamp}f)$	$L_{ИП} = 410$
Амплитуда пульсаций тока лампы, А	$I_{Lm-} = I_{Lamp} / [8Cf\sqrt{R_{Lamp}^2 + (2\pi fL)^2}]$	$0,05I_{Lamp} > I_{Lm-} = 0,002$

6. Рассчитываем коэффициент пульсаций мгновенного тока и мощности лампы. Для устранения явления акустического резонанса расчетный коэффициент не должен превышать значения, рекомендуемого для заданного типа разрядных ламп [8]. Исходя из практических результатов исследования поведения разряда, рекомендуем ограничить амплитуду пульсаций тока лампы на уровне, не превышающем 5% его номинального значения.

$$I_{Lm-} \approx I_{Lamp} / 8Cf\sqrt{R_{Lamp}^2 + (2\pi fL)^2} < 0,05I_{Lamp}$$

Если расчетные пульсации превышают заданное значение, следует повысить частоту модуляции либо несколько увеличить значение емкости и индуктивности фильтра в рамках рекомендуемых значений.

7. Производим выбор силовых ключей и конденсаторов, а также конструктивный расчет магнитных элементов.

Контроллер тока лампы (МС33262D) обеспечивает режим граничного тока в дросселе $L_{ИП}$. Стабилизация мощности (регулирование тока в зависимости от напряжения на лампе) и управление зажиганием лампы осуществляется микропроцессорным блоком управления.

Этот блок реализует также функции защиты при неисправной лампе, отсутствии лампы и коротком замыкании на выходе источника питания. Управляющее напряжение на затвор транзистора VT1 формируется драйвером верхнего уровня (к примеру, IR2117). Для управления транзисторами моста используется специализированная микросхема (возможные варианты — UBA2030, IRS2453D).

Питание импульсного преобразователя производится стабилизированным напряжением $U = 380 \text{ В}$ с выхода корректора коэффициента мощности, управляемого, например, той же МС33262D.

Данные электрических параметров лампы приведены в таблице 1.

Рассчитанные параметры источника питания приведены в таблице 2. Используются экспериментальные характеристики лампы CDM-T 70W [3].

Литература

1. Поляков В. Д. Источники питания разрядных ламп высокого давления // Силовая электроника. 2009. № 4.
2. Обжерин Е. А., Поляков В. Д., Пузанов В. А., Смирнов Е. М. Особенности анализа и расчета

современных систем питания ламп высокой интенсивности // Светотехника. 2006. №6.

3. D. HJ. van Casteren. Dimming of metal halide lamps // Technische Universiteit Eindhoven. 1999. <http://alexandria.tue.nl/extra2/afstversl/E/560839.pdf>
4. Поляков В. Д., Обжерин Е. А. Моделирование электрической проводимости натриевой лампы высокого давления // Вестник МЭИ. 2003. № 4.
5. Клыков М.Е., Корягин О.Г., Краснополский А.Е. Моделирование электрических цепей с натриевыми лампами высокого давления // Светотехника. 2003. №4.
6. Shvatsas M., Ben-Yaakov S. A SPICE compatible model of high intensity discharge lamps // 30th IEEE power electronic specialists conference. 1999. Vol. 2.
7. Поляков В. Д. Динамические свойства системы «Импульсный источник электропитания — газовый разряд» // Практическая силовая электроника. 2003. № 11.
8. Stormberg H.-P., Schafer R. Excitation of acoustic instabilities in discharge lamps with pulsed supply voltage // Lighting research & technologies. 1983. Vol. 15. №3.
9. MHN-TD 70W Driver with UBA2030 // Philips Semiconductors. 1999. AN10178_01.