

УДК 538.8:621.365.2

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП

Куренный Э.Г., Арутюнян А.Г.

Донецкий национальный технический университет  
led@dgtu.donetsk.ua

The systems of electrical illumination with individual and group converters of frequency are considered. The influence of frequency on productivity of the man is shown. For the industrial enterprises the circuit with an intermediate network of a constant current is recommended.

В промышленности широко применяются газоразрядные лампы (далее – лампы) высокого давления – не только для общего и наружного, но и для рабочего освещения. Это объясняется тем, что для производств с напряженной зрительной работой требуются большие уровни освещенности: от 1500 до 5000 лк. Лампы же низкого давления могут обеспечить освещенность до 600-1000 лк.

Препятствием для применения ламп являются создаваемые ими пульсации освещенности рабочих мест. Для уменьшения пульсации лампы переводят на питание напряжением повышенной частоты. Обычно рассматривается вариант применения ламп с индивидуальными преобразователями частоты (ПЧ). Однако технико-экономические показатели систем электрического освещения зависят не только от вида ламп, но и от электрической сети. Поэтому актуальной задачей является оценка эффективности применения групповых ПЧ.

Рассмотрим вначале вопрос выбора частоты питания ламп для индивидуальных и групповых ПЧ, для чего оценим влияние пульсации освещенности на человека. Следует отметить, что используемое в нормах искусственного освещения понятие коэффициента пульсации  $K_n$  является неопределенным, так как учитывает только диапазон и среднее значение пульсации [1], хотя воздействие пульсации зависит от ее формы: очевидно, что импульсы прямоугольной формы опаснее, чем гармонические. При одинаковых коэффициентах пульсации и одной форме пульсации вредное воздействие уменьшается с увеличением частоты.

Универсальным показателем является доза пульсации  $\psi$  [2, 3], которая, как и доза фликера [4], оценивает дополнительное утомление человека, но в другом частотном диапазоне. Основу соответствующей модели пульсации составляет взвешивающий фильтр 1 (рис. 1), который моделирует реакцию  $\xi(t)$  зрения человека на изменение мгновенных значений освещенности  $e(t)$ . Утомление человека моделируется квадратором 2 и звеном 3 десятиминутного осреднения.

Вследствие больших частот пульсации доза практически совпадает с дисперсией  $D_\xi$  реакции, что существенно упрощает расчеты.

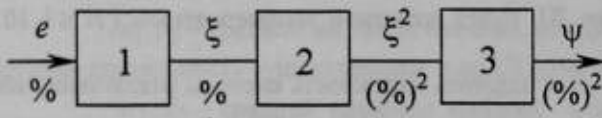


Рисунок 1 – Модель пульсации

Анализ показал, что амплитудно-частотная функция (АЧФ) фильтра в области частот  $\lambda$  пульсаций более  $\lambda_1 = 100$  Гц убывает обратно пропорционально частоте. Приняв за единицу ординату АЧФ при 100 Гц, получим, что

$$A(\lambda) = 100/\lambda. \quad (1)$$

Для гармонической пульсации с амплитудой  $K_n$  и частотой  $\lambda$  доза в  $(\%)^2$

$$\psi = D_\xi = K_n^2 A^2(\lambda) / 2 = 5000 K_n^2 / \lambda^2. \quad (2)$$

Доза измеряется в  $(\%)^2$ , что неудобно. Для перехода к процентам введем понятие коэффициента дозы  $K_\psi$ , который в [2] именовался «кумулятивным коэффициентом пульсации». Естественно потребовать, чтобы для гармонической пульсации частотой 100 Гц этот коэффициент совпал бы с коэффициентом пульсации. При этой частоте АЧФ равна единице, поэтому согласно (2) получим выражение

$$\psi_1 = K_n^2 / 2,$$

из которого следует, что для перехода к коэффициенту дозы необходимо учесть нормирующий множитель 2:

$$K_\psi = \sqrt{2\psi}. \quad (3)$$

Для гармонической пульсации с любой другой частотой  $\lambda > \lambda_1$  согласно (2) коэффициент дозы

$$K_\psi = 100 K_n / \lambda \quad (4)$$

убывает обратно пропорционально частоте.

Допустимое значение  $K_{\psi \text{ доп}}$  коэффициента дозы в процентах принимается равным допустимому значению  $K_n \text{ доп}$  коэффициента пульсации для рассматриваемого вида зрительной работы.

Частота питающего лампы напряжения выбирается из условия

$$K_{\psi} \leq K_{\psi_{\text{д}}}. \quad (5)$$

Нормы устанавливают предельный уровень пульсации. Для обоснования целесообразности уменьшения пульсации до меньших уровней необходимо учесть, по меньшей мере<sup>1</sup>, положительный эффект от увеличения производительности труда.

Для каждого производства необходимо иметь зависимости производительности труда от коэффициента дозы. Методику определения такой зависимости проиллюстрируем на примере люминесцентных ламп. Опытным путем (Ф.М. Черниловская) были найдены значения производительности П при одно-, двух- и трехфазном включении ламп, причем за 100 % была принята производительность при однофазном включении. Во время опытов регистрировались коэффициенты пульсации на соответствующих частотах 100, 200 и 300 Гц, т.е. фактически коэффициенты доз. Были получены следующие значения коэффициентов и производительности: 73 и 100; 40 и 115,8; 13 и 138,6 %.

Методом наименьших квадратов опытные данные нами были аппроксимированы выражением

$$П = 100 + 40,34 \exp(-K_{\psi}^2 / 426) \quad (6)$$

с погрешностью менее 0,9 %.

По смыслу расчетная производительность относится к случаю работы при неизменной освещенности. Именно эту производительность естественно принять за 100 %. При нулевом коэффициенте дозы формула (6) дает значение 140,34 %. Вводя нормировочный множитель 100/140,34, вместо (6) получим искомую зависимость:

$$П_{\cdot} = 71,3 + 28,7 \exp(-K_{\psi}^2 / 426), \quad (7)$$

которая справедлива для пульсации любой формы.

Так как частота пульсации равна удвоенной частоте  $f$  питающего лампы напряжения, для частного случая гармонической пульсации подстановка (4) в (7) дает

$$П_{\cdot} = 71,3 + 28,7 \exp(-23,474 K_n^2 / \lambda^2) = 71,3 + 28,7 \exp(-5,868 K_n^2 / f^2). \quad (8)$$

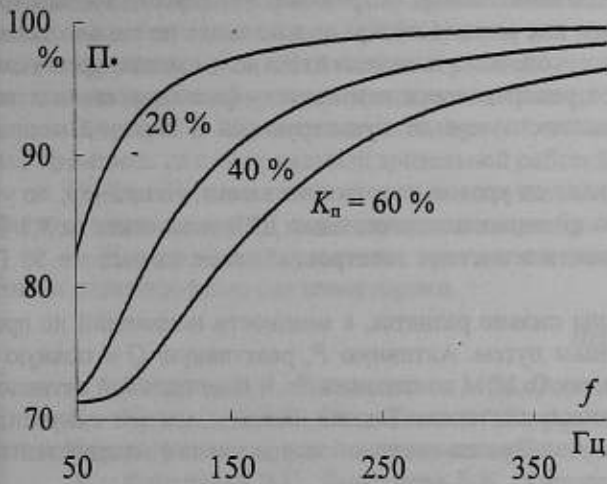


Рисунок 2 – Зависимости производительности труда от частоты напряжения на лампах

Иначе обстоит дело с групповым ПЧ, где увеличение частоты приводит к возрастанию активного сопротивления сети вследствие поверхностного эффекта. Это приводит к увеличению потерь активной мощности и напряжения. Поэтому для групповых ПЧ целесообразно принять такую частоту, при которой поверхностный эффект еще практически не сказывается, но вредное воздействие пульсации уже проявляется мало. Как видно из рис. 2, существенное увеличение производительности происходит при частотах питающей сети до 300–400 герц. Отсюда следует вывод, что рациональной для этой схемы является стандартная частота 400 Гц. В этом случае конструкция ламп не изменяется, а уменьшаются лишь габариты и активное сопротивление дросселя.

Полученные зависимости производительности от частоты напряжения на лампах (рис. 2) могут быть использованы как приближенные для пульсации другой формы, если под  $K_n$  понимать амплитуду первой гармоники пульсации. Это объясняется тем, что именно первая гармоника определяет значение коэффициента дозы.

ПЧ включает в себя выпрямитель 4 и инвертор 5. Если установить ПЧ на каждой лампе, то как и в схеме без ПЧ (рис. 3,а) сохраняется питающая сеть с частотой  $f_1 = 50$  Гц (рис. 3,б). В схеме с групповым ПЧ (рис. 3,в) осветительная сеть переводится на повышенную частоту. В предложенной одним из авторов схеме с общим выпрямителем и индивидуальными инверторами (рис. 3,г) сеть выполнена на постоянном токе, а лампы включаются либо через индивидуальные инверторы или групповые – для участков цеха с разными требованиями к качеству освещения.

С увеличением частоты производительность увеличивается, поэтому для индивидуальных ПЧ следует принимать как можно большую частоту, оптимизируя конструкцию ламп и пускорегулирующей аппаратуры.

<sup>1</sup> Пульсации ухудшают зрение и здоровье человека, поэтому представляется необходимым путем экспертных оценок установить еще и величины затрат на возмещение социального ущерба – в зависимости от уровня пульсации.

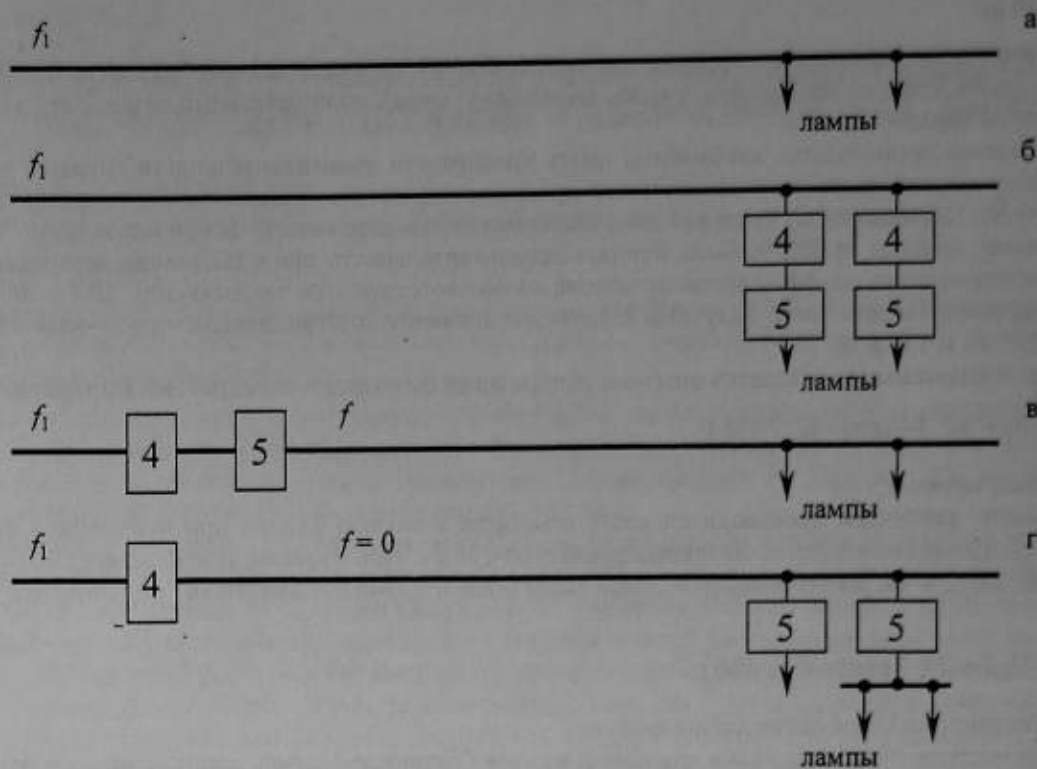


Рисунок 3 – Схемы питания ламп

Схема с общим выпрямителем сочетает достоинства других схем: лампы и пускорегулирующая аппаратура могут быть выбраны на очень большую частоту, а сопротивление осветительной сети будет только омическим, меньшим активного сопротивления даже на частоте 50 Гц.

Потери электроэнергии в разных схемах будут различными. Лампы потребляют несинусоидальный ток, сдвинутый по фазе относительно напряжения сети. Поэтому для расчета потерь нужно знать не только активную мощность ламп, но и их реактивную мощность, а также мощность искажений. Во всех схемах, кроме схемы с общим выпрямителем, трудно добиться равномерного распределения ламп между фазами, в связи с чем дополнительно необходимо учитывать составляющие активных потерь от пульсирующей и скрытой мощностей, возникающих из-за несимметричной нагрузки.

В действующих сетях параметры режимов ламп зависят от уровня напряжения в сети. Например, по усредненным данным [5], при увеличении напряжения на 5 % активная мощность ламп ДРЛ возрастает на 8,1 %, а срок службы сокращается на 20 %. Общие потери мощности в системе электроснабжения на частоте 50 Гц увеличиваются на 5 %.

В литературе данные о влиянии напряжения на лампы сильно разнятся, а мощности искажений не приводятся. Поэтому необходимо определять мощности опытным путем. Активную  $P$ , реактивную  $Q$  и полную  $S$  мощности целесообразно выражать в относительных единицах (о.е.) – по отношению к номинальной активной мощности, а напряжение  $U$  – по отношению к его номинальному значению. Так как лампы искажают синусоиду тока, то квадрат полной мощности будет превышать сумму квадратов активной и реактивной мощностей на величину квадрата мощности искажений

$$N_{\text{и}} = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (9)$$

Следует подчеркнуть, что к выбору аппроксимирующих опытные точки выражений необходимо подходить очень внимательно. Дело в том, что в литературе зависимости мощностей от напряжения обычно аппроксимируют прямыми линиями. Однако при этом трудно добиться соответствия результатов. Поясним это на следующем примере. Для лампы ДРЛ-250 мощностью 250 Вт при разных напряжениях от 1 до 1,2 были выполнены замеры тока  $I$ , активной и реактивной мощностей. Расчетным путем были получены значения полной мощности

$$S = UI$$

и мощности искажений (9). Опытные точки для всех мощностей могут быть аппроксимированы линейными зависимостями:

$$P = 2,96U - 1,96,$$

$$Q = 5,355U - 3,998,$$

$$N_{\text{и}} = 0,672 - 0,159U,$$

$$S = 5,905U - 4,143.$$

Погрешности аппроксимации для каждой из мощностей невелики, однако соотношение между мощностями не выполняется, поскольку подстановка полученных выражений в (9) не дает тождества. В связи с этим возьмем линейные зависимости для трех мощностей, а четвертую выразим через них. Если линейными считать активную, реактивную и полную мощности, то формула (9) даст не прямую, а нелинейную кривую для мощностей искажений

$$N_{\text{н}} = \sqrt{-2,5686U^2 + 5,493U - 2,6611}.$$

Погрешность этой формулы несколько больше, чем при линейной аппроксимации, но не превышает 2%. Тем не менее, принять эту зависимость нельзя, так как она изменяется немонотонно при увеличении напряжения: имеет максимум внутри интервала изменения напряжения, что противоречит физическому смыслу.

Напротив, если линейными считать зависимости от напряжения активной, реактивной мощностей, а также мощности искажений, то нелинейной уже будет зависимость полной мощности

$$S = \sqrt{37,463U^2 - 54,636U + 20,277},$$

но она является монотонно возрастающей, практически не отличающейся от прямой линии. Поэтому этот вариант аппроксимации вполне приемлем.

Сказанное относится и к случаю, когда опытные точки аппроксимируются нелинейными зависимостями, как например, параболы. При этом необходимо аппроксимировать опытные точки параболы для трех из четырех мощностей.

Технико-экономическое сопоставление различных схем показало, что вариант с промежуточной сетью постоянного тока дает наибольший экономический эффект: по сравнению со схемой с групповым ПЧ она на 13,64% эффективнее. Применение сетей постоянного тока возможно не только для питания освещения, но и компьютеров, систем управления. В этом случае эффективность будет еще выше.

Следует отметить, что из-за изменений напряжения в сети и флуктуаций газового разряда пульсации представляют собой случайный процесс, реализации которого являются не периодическими, а потому не могут быть представлены в виде ряда Фурье. Однако спектральная плотность пульсации имеет ярко выраженные максимумы на частотах гармоник, которые в основном определяют значение дисперсии пульсации. В связи с этим для практических целей все же можно использовать разложение в ряд Фурье, но в пределах каждого цикла пульсации. В качестве расчетного принимается наибольшее значение дисперсии из вычисленных для каждого цикла. Более того, поскольку АЧФ (1) даже для второй гармоники уменьшается вдвое, то, как отмечалось, при оценке производительности можно ограничиться только основной гармоникой. Вместе с тем, при вычислении составляющих потерь активной мощности от мощности искажений необходимо рассматривать все гармоники.

**Выводы.** 1. Применение повышенной частоты для питания газоразрядных ламп эффективно не только для производств с напряженной зрительной работой, но и для систем наружного освещения.

2. Для питания ламп по схеме с групповым преобразователем частоты рекомендуется частота 400 Гц. Частота питания ламп с индивидуальными преобразователями частоты не ограничивается.

3. Перспективным является применение систем освещения с общим выпрямителем, сетью постоянного тока и индивидуальными инверторами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мешков В.В., Епанешников М.М. Осветительные установки. – М.: Энергия, 1972. – 135 с.
2. Куренный Э.Г., Шидловский А.К., Арутюнян А.Г. Динамические модели электромагнитной совместимости электрических источников света. – Техническая электродинамика, 1985, № 2. – С. 12-16.
3. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Куренный Д., Цыганкова Н.В. Совершенствование фликер-модели. – Электричество, 2003, № 2. – С. 17-23.
4. Flickermeter. Functional and design specification. – Geneva: IEC Report. – 1986. – Publication 868.
5. Борисов Б.П., Вагин Г.Я., Крахмалин И.Г., Солнцев Е.Б. Экономические модели электроприемников и узлов нагрузки. – Киев: Институт электродинамики. – Препринт АН УССР, № 629. – 37 с.