УДК 628.9.04

**Об одном эффективном способе снижения уровня эмиссии высших гармоник промышленной частоты светодиодными**

**лампами в электросеть**

Тукшаитов Р.Х., Почетный профессор ФГБОУ ВО «КГЭУ», кафедра «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»

Зарипов Р.К., аспирант ФГБОУ ВО «КГЭУ», кафедра «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» КГЭУ

**В работе описан эффективный способ снижения уровня эмиссии высших гармоник промышленной частоты при использовании нагрузок с высоким коэффициентом нелинейных искажений - светодиодных ламп. При этом установлена возможность снижения уровня нелинейных искажений входного тока нагрузок более, чем в 7-10 раз. Снижение эмиссии высших гармоник достигается параллельным подключением к входу нагрузки конденсатора, реактивная мощность которого на два порядка больше реактивной мощности нагрзки.**

**Ключевые слова:** коэффициент мощности, коэффициент нелинейных искажений, энергосеть, светодиодная лампа, эмиссия, переток электроэнергии.

Проблема подавления высших гармоник в электросетях ранее обсуждалась в ряде работ [1-3] и продолжает оставаться актуальной [4, 5] по сей день в силу широкого внедрения в промышленность изделий силовой электроники. В настоящее время в условиях ЖКХ применяется значительное количество нелинейных нагрузок - светодиодных ламп, общее число которых в большинстве квартирах составляет от 5-6 до 10-12 при суммарной мощности их потребления до 100 Вт. Это обусловлено высокой их энергоэффективностью, которая при оптимальном использовании угла излучения, уменьшении высоты подвеса и применении систем автоматического регулирования освещенности в течение суток позволяет уменьшить энергопотребление по сравнению с лампами накаливания в 15-30 раз. Положительным явлением в светодиодных лампах (СДЛ) является также то, что небольшая емкостная составляющая их тока, имея небоьшое отрицательное значение cosϕ (0,90-0,98) по существу способствует дополнительному перетоку электроэнергии в электросети [6]. Вместе с тем, СДЛ имеют небольшой коэффициент мощности (0,40-0,55), определяемый главным образом значительным коэффициентом нелинейных искажений, достигающий в ряде их типах до 200% [7].

При комбинированном способе подключения линейных и нелинейных нагрузок и выполнении определенного соотношения между их потребляемыми мощностями можно существенно снизить уровень эмиссии высших гармоник (ВГ) в электросеть (ЭС) [8]. Наличие нелинейных нагрузок ведут не только к дополнительным недооцениваемым потерям мощности в ЭС, но и побочным негативным явлениям, снижающих надежность и безопасность работы энергосистем и телекоммуникационной аппаратуры.

Значительный уровень искажения синусоидальности входного тока у СДЛ обусловлен отсутствует в них, в отличии от светодиодных светильников, корректора коэффициента мощности (ККМ).

В работе поставлена задача разработать эффективный способ снижения уровня эмиссии в электросеть высших гармоник промышленной частоты светодиодными лампами.

**Методика исследований**

В качестве физической модели нагрузки, имеющей большое значение коэффициента нелинейных искажений *Ki*, выбрана светодиодная лампа. Такая модель позволяет более детально показать уровень снижения коэффициента нелинейных искажений при применении соответствующего способа его снижения. В работе осуществлялось параллельное подсоединение к электросети СДЛ разных марок мощностью 7-10 Вт в количестве от 1 до 8, имевшихся в распоряжении исследовательской лаборатории. Для снижения уровня генерации высших гармоник в электросеть параллельно нагрузке подключался конденсатор, емкость которого (С) повышали с 0,1 до 80 мкФ с пробивным наряжением 300 В, обеспечивший снижение коэффициента гармоник до 13-16%, что соответствует потери активной мощности искажения всего на 0,5-1,5 % [9].

При значении емкости конденсатора более 1 мкФ значение полной мощности СДЛ становится практически равно ее реактивной мощности (S≈Q). Поэтому для характеристики уровня подавления ВГ в качестве одного из информативных показателей использовали отношение Q/S.

Для выбора оптимальной емкости конденсатора в соответствии с мощностью нагрузки и выяснения механизма уменьшения коэффициента нелинейных искажений определяли значения следующих показателей: потребляемая мощность, коэффициента мощности, cosϕ, полная мощность, действующее значение входного тока, длительности импульса входного тока используемого устройства и его переднего фронта, спектральные гармонические составляющие тока и вольт-амперные характеристики входной цепи устройства. Для измерения этих показателей СДЛ применили анализатор качества электрической энергии AR-5.

В работе для дифференциации коэффициент нелинейных искажений по току обозначили через *Ki* изм., что идентично аббревиатуре *ТHDi*, приводимой в англоязычной литературе. Коэффициент нелинейных искажений вычисленный расчетным путем обозначали через *Ki* расч.. Кривые ВАХ импульсного входного тока СДЛ, отражаемые на экране дисплея анализатора, фотографировали, оцифровывали и заново строили их в Excell, что позволило осуществить сравнительную их характеристику по ряду показателям: длительность импульса тока, длительность переднего фронта и время его смещения относительно начала периода напряжения электросети.

**Результаты исследований**

В таблице 1 приведены значения измеренных основных показателей для ряда СДЛ при обычном способе их подключения к электросети.

Табл. 1. Основные электротехнические показатели ряда СДЛ

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Модель | *Р*, Вт | *I*, А | λ | *KU*, % | *Ki* изм., % | cosϕ |
| 1 | Camelion 10 Вт | 10 | 0,095 | -0,48 | 2,4 | 183 | -0,96 |
| 2 | Bellight 10 Вт | 8 | 0,075 | -0,52 | 2,7 | 164 | -0,90 |
| 3 | Эра 12 Вт | 8 | 0,071 | -0,51 | 2,8 | 161 | -0,96 |
| 4 | ASD 11 Вт | 9 | 0,079 | -0,52 | 2,3 | 161 | -0,97 |
| 5 | Wolta 9 Вт | 8 | 0,075 | -0,50 | 2,4 | 149 | -0,89 |
| 6 | Gaus 10 Вт | 7 | 0,07 | -0,46 | 2,7 | 147 | -0,80 |
| 7 | Rexant 11,5 Вт | 10 | 0,083 | -0,55 | 3,0 | 142 | -0,95 |
| 8 | Онлайт 10 Вт | 7 | 0,054 | -0,61 | 2,4 | 127 | -0,98 |

Как следует из таблицы 1 СДЛ имеют высокие значения коэффициента нелинейных искажений. Максимальное его значение отмечается у Camelion - 183%, а минимальное у Онлайт - 127%. Для большей наглядности влияния значения емкости подключаемого конденсатора на уровень *Ki* изм. был проведен следующий эксперимент со СДЛ Camelion, имеющий наибольшее его значение (табл. 1). СДЛ имеют достаточно большие значения коэффициента *Ki* изм., которые приблизительно на два порядка больше коэффициента нелинейных искажения напряжения электросети (*KU*). Поэтому последнее практически не сказывалось на результатах измерения *Ki* изм..

Результаты измерения *Ki* изм. представлено в таблице 2. Значение реактивной мощности конденсатора определялось расчетным путем.

Табл. 2. Зависимость коэффициента нелинейных искажений СДЛ Camelion от емкости конденсатора

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| С, мкФ | 0 | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 10 | 20 | 40 | 80 |
| *KI* | 183 | 163 | 120 | 84 | 49 | 25 | 17 | 15 | 14 | 13 |
| S, ВА | 18 | 21 | 23 | 27 | 43 | 65 | 150 | 230 | - | - |
| QC, Вар | 17 | 84 | 420 | 1675 | 3350 | 6700 | 16700 | 33400 | 67000 | 134000 |
| QC/S | 0,94 | 4,0 | 16 | 39 | 88 | 103 | 111 | 145 | - | - |

Примечание: при емкости конденсаторов более 30 мкФ анализатор AR-5 не позволяет вычислить коэффициент мощности с необходимой точностью.

Как следует из таблицы 2 по мере увеличения емкостиконденсатора значение коэффициента *Ki* изм. экспоненциально уменьшается и при емкости в 20 мкФ принимает достаточно малые значения. При этом отношение Q/S составляет порядка 145. Данный характеристический показатель необходим для выбора требуемого значения емкости конденсатора в зависимости от суммарной мощности нагрузки.

В следующем эксперимента для повышения потребляемой мощности нагрузки было параллельно соединено 8 СДЛ с поэтапным подключением к их входу конденсатора с разной емкостью. Мощность такой осветительной установки составила 92 Вт при силе тока во входной цепи в 4,6А. Результаты измерения показателей данной осветителной системы представлены в таблице 3.

Табл. 3. Зависимость коэффициента нелинейных искажений восьми СДЛ мощностью 92 Вт от емкости подсоединяемого конденсатора

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| С, мкФ | 0 | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 10 | 20 | 40 | 80 |
| *KI*, % | 128 | 128 | 128 | 119 | 102 | 86 | 49 | 28 | 21 | 16 |
| S, ВА | 120 | 129 | 129 | 131 | 133 | 144 | 232 | 433 | 767 | 1575 |
| QC, Вар | 17 | 840 | 1675 | 3350 | 6700 | 16700 | 33400 | 67000 | 134000 | 268000 |
| QC/S | 0,14 | 6,5 | 13 | 26 | 50 | 116 | 144 | 155 | 175 | 176 |

Установлено, что по мере подсоединения все большего количества СДЛ (вплоть до 8) происходит усреднение коэффициентов нелинейных искажений. При подсоединении 8 СДЛ получено *Ki* изм. равном 127%, что на 20% меньше среднего арифметического его значения *Кi* сред.. При уменьшении количества подключаемых ламп *KI* расч. остаетсяна 15-20% выше *KI* изм.. Полученные результаты позволяют предложить выражение для описания соотношения между *Ki* изм. и *KI* сред в виде:

*KI* изм. < *KI* расч. = Σ *KI* / n,

где n – количество подключенных ламп.

Для наглядности характера изменения зависимости *KI* изм. от значения емкости конденсатора на рисунке 1 одновременно представлены 2 кривые при подключении 1 и 8 СДЛ.

**C,мкФ**

Кi изм. После С пробел, рис. Уменьщить, чтобы с не уплывало.

Рис. 1. Зависимость коэффициента нелинейных искажений от входной емкости при подключении разного количества СДЛ

- - одна СДЛ, - - 8 СДЛ (уменьшить размер маркеров)

Из рисунка 1 следует, что значительное повышение емкости конденсатора не имеет смысла, так как при этом кривая зависимости *KI* изм. от емкости конденсатора принимает весьма пологий характер. Так, увеличение емкости с 40 мкФ до 80 мкф приводит к снижению *Ki* изм.лишь на 7,5%. Как следует из графика, при повышении количества подключаемых ламп для снижения *KI изм.* до оптимального уровня (*Кi* опт.) следует повышать емкость конденсатора. При подключении конденсатора большой емкости к большому количеству СДЛ, согласно данным таблицы 1, значительно возрастает сила тока во входной цепи осветительной установки, но в полне допустимых пределах. Во избежание большой силы тока конденсаторы целесообразно подсоединять к распределенным нагрузкам осветительной системы, ограничившись мощностью каждой из них в 100-300 Вт.

Рис. 2. Характер уширения импульса тока СДЛ Camelion по мере повышения на ее входе значения емкости конденсатора до 20 мкФ

На рисунке 2 для наглядности представлено характер уширения длительности импульса входного тока по мере повышения емкости подключаемого конденсатора. В силу этого амплитуда ВГ становится меньше. Поэтому среднее значение *KI* изм. СДЛ измеренное анализатором при подключениинескольких ламп порядка на 15-20% меньше среднего арифметического значения *KI* сред.. Механизм уширения импульса входного тока заключается в том, что ток входной емкости заметно опережая напряжения электросети способствует более раннему началу электропитания лампы в течение каждого полупериода, что вызывает более раннему формированию начала импульса входного тока СДЛ и увеличение его длительности.

**Выводы**

1. Предложен способ уменьшения коэффициента нелинейных искажений светодиодных осветительных систем, заключающийся в параллельном подключении к входу ламп конденсатора сравнительно большой емкости.
2. Для обеспечения значения коэффициента нелинейных искажений на минимальном уровне значение реактивной мощности конденсатора в зависимости от потребляемой мощности должно более, чем на два порядка превышать суммарную потребляемую мощность подсоединяемых СДЛ.
3. Конденсаторы с оптимальной реактивной мощностью на рабочее напряжение 300 В целесообразно устанавливать отдельно по распределенным светодиодным устройствам, с потребляемой мощностью каждой не превышающей 100-300 Вт.

Литература

1. Хруслов Л.Л., Ростовников М.В., Шишов В.А., Киреев С.И. Высшие гармоники в сетях низкого напряжения с элементами силовой электроники. Опыт непрерывного мониторинга // Сб. трудов Международной научно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии». М.: Центр полиграфических услуг «Радуга», 2018. С. 181-186.
2. Зырянов В.М., Митрофанов Н.А., Соколовский Ю.Б. Исследование гармонического состава напряжения преобразователя частоты // Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 1. С. 1-7.
3. Мустафа Г.М., Гусев С.И. Особенности использования многоуровневых преобразователей для нормализации показателей качества напряжения электрической сети // Специальный выпуск. ?????Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 4. С. 58-65.
4. Тукшаитов Р.Х., Ниматуллин Р.М., Айхайти Исыхакэфу, Салимуллин М.Ф. Оценка качества электрической энергии по уровню коэффициента искажения напряжения электросети // Успехи современной науки. 2016. № 10. Т. 2. С. 105-107.
5. Тукшаитов Р.Х. О коэффициенте мощности и cosφ выпрямительного устройства при разных активно-емкостных нагрузках и уровне эмиссии в электросеть высших гармоник // Практическая силовая электроника. 2019. № 3. С. 9-11.
6. Тукшаитов Р.Х., Шириев Р.Р. Определение уровня нелинейных искажений входного тока разных типов нагрузок на основе измерения коэффициента мощности и его сомножителя cosφ // Практическая силовая электроника. 2018. № 4 (72). С. 30-36.
7. Тукшаитов Р.Х., Семенова О.Д. Об одном способе подключения «нелинейных» нагрузок для снижения уровня их влияния на качество напряжения электросети // В сборнике: Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники**:** матер. III Всерос. науч.-практ. конф. / редкол.: Э.Ю.  Абдуллазянов (гл. редактор) и др. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2021. С. 247-251.
8. Айхайти Исыхакэфу. Метод комплексного контроля качества светодиодных осветительных приборов на основе исследования их характеристик // Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. технич. наук. Казань: КГЭУ, 2018. 16 с.
9. Тукшаитов Р.Х., Семенова О.Д., Новокрещенов В.В. Оценка уровня нелинейных искажений электроустановок на основе моделирования длительности импульса их входного тока // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. № 3. С. 23-26.

REFERENCES 1.