

УДК 621.311.1

DOI: 10.22213/2413-1172-2026-2-86-97

Метод прогнозирования уровня гармонических составляющих в сетях освещения по значению коэффициента нелинейных искажений тока осветительных электроприборов с учетом воздействия внешних факторов

Р. К. Зарипов, аспирант, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

А. Е. Сидоров, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Статья посвящена анализу зависимости уровня гармонических составляющих тока в локальных низковольтных сетях освещения от изначальных параметров подключенных к ней осветительных приборов разного типа и различных внешних факторов. Цель исследования – изучить зависимость изначального коэффициента нелинейных искажений тока осветительных электроприборов от различных параметров и разработать универсальный метод прогнозирования реального уровня гармонических составляющих для участка цепи по их значению. В работе приведены результаты экспериментальных замеров основных характеристик и коэффициентов нелинейных искажений тока K_I различных линейных и нелинейных осветительных приборов. Изучена зависимость их значения от ряда внешних факторов: суммарной нагрузки электросети, времени суток, несинусоидальности напряжения электросети, удаленности источника эмиссии высших гармоник от точки контроля и наличия подключенных параллельно к электросети электроприборов различного типа. В качестве решения предложена формула расчета прогнозируемого уровня гармонических составляющих осветительной сети с поправочными коэффициентами для каждого практического случая, позволяющей по лабораторным значениям K_I осветительных приборов предсказать уровень возможных нагрузок электросети и подобрать эффективные решения для поддержания качества электроэнергии при минимальных затратах. Поправочные коэффициенты предложено назвать коэффициентом удаленности K_L , делающим поправку на удаленность точки подключения специальных фильтр-компенсирующих установок (ФКУ) от источника эмиссии высших гармоник; коэффициентом несинусоидальности напряжения K_U , позволяющим учитывать текущее состояние синусоидальности напряжения в сети, и коэффициентом взаимоподавления K_N , допускающим приближение объективности оценки суммарных гармонических составляющих участка цепи по коэффициенту нелинейных искажений тока каждого устройства. Полученные результаты позволяют достоверно спрогнозировать реальный уровень гармонических нагрузок локальных осветительных сетей по параметрам подключаемых световых приборов и характеристикам электросети для подбора оптимальных фильтр-компенсирующих установок.

Ключевые слова: нелинейная нагрузка, коэффициент нелинейных искажений тока, высшие гармоники, гармоническая составляющая тока, электросеть, фильтр-компенсирующая установка.

Введение

С остав электрооборудования современных электрохозяйств непрерывно пополняются различными электроприборами с нелинейными вольт-амперными характеристиками, к которым можно отнести персональные компьютеры и ноутбуки, источники бесперебойного питания, осветительное оборудование, бытовую технику с преобразователями электроэнергии типа AC-DC и др. Среди них особо можно выделить высокоэффективные светодиодные осветительные приборы с импульсными источниками питания, обладающие высокой энергоэффективностью и большим ресурсом [1–3], но при этом имеющие достаточно ощутимый уровень деградации светового потока и изменения интенсивности его мерцания [4–6], а также высокий показатель эмиссии гармонических составляющих в локальные электросети [7–11]. Светодиодные лампы, в том числе на основе филаментов, светодиодные светильники, осветительные приборы на люминесцентных лампах с различными видами пуск-регулирующей аппаратуры и компактные люминесцентные лампы имеют высокие коэффициенты нелинейных искажений тока и создаваемые ими высшие гармоники (ВГ), которые негативно влияют на рабо-

тоспособность других электроприборов сети [12–14], особенно высокочувствительных: систем видеонаблюдения и связи, автоматизированных устройств доступа, пожарной безопасности и др. Несмотря на наличие требований нормативных документов, обязывающих разработчиков при проектировании и производстве любых моделей осветительных приборов добиваться высокой электромагнитной совместимости, учитывать все возможные негативные факторы и минимизировать их последствия [15–17], на практике часто встречается световое оборудование, превышающее нормируемые уровни гармонических составляющих.

При искусственном освещении объектов любого назначения качество электрической энергии в локальных сетях остается важным фактором работоспособности электроприемников и электрической сети электрохозяйства в целом, так как с каждым годом повышаются объемы потребления электроэнергии, усиливаются нагрузки на электрические сети, увеличиваются чувствительность электроприборов к качеству электрической энергии [18–20]. Для стабильной работы электросетей с высоким уровнем гармонических составляющих применяют ФКУ, но и они имеют ряд недостатков

[21, 22], ограничивающих их практическое применение.

Качество электрической энергии в первую очередь оценивается по коэффициенту нелинейных искажений напряжения K_U , а электромагнитная совместимость электроприемников и степень уровня эмиссии ВГ в электросети по коэффициенту нелинейных искажений тока K_I , именуемых в зарубежной литературе как THD_I . Коэффициенты нелинейных искажений считаются в процентах от тока и напряжения основной гармоники и отображают степень нелинейности электроприборов. По их значению можно определить уровень эмиссии гармонических составляющих в электросети для одиночных светильников или группы осветительных приборов с идентичными характеристиками, поскольку показатели высших гармоник зависят от силы тока электроприбора, т. е. от его мощности и коэффициента мощности. В случаях когда характеристики светильников, подключенных параллельно к одной осветительной электросети, отличаются, оценка уровня гармонических составляющих только по коэффициенту нелинейных искажений тока может быть недостоверной и необходимо анализировать по другим параметрам, например по значениям гармонических составляющих тока I_H в именованных единицах – амперах, которая более информативна для оценки уровня суммарной нагрузки ВГ тока в локальных электросетях. Соответственно, необходимо определить и экспериментально проверить сценарии, при которых прогнозирование уровня гармонических составляющих в осветительных сетях по коэффициенту нелинейных искажений тока будет достоверной, и разработать упрощенный метод, который позволит спрогнозировать по K_I реальную гармоническую нагрузку электросети по вводным параметрам: вводные характеристики электросетей, тип и количество подключаемого светового оборудования, их взаимную удаленность и точки подключения ФКУ. По результатам предварительной оценки будет возможно заранее предсказать уровень суммарных гармонических нагрузок на осветительные сети и их возможные пределы, подобрать оптимальные комплектующие и правильно расположить ФКУ.

Цель исследования – изучить зависимость коэффициента нелинейных искажений тока нагрузок от различных факторов и разработать универсальный метод оценки и прогнозирования реального уровня гармонических составляющих сетей освещения по значению КНИ отдельных осветительных электроприборов.

Исходя из сформированной цели исследования, можно определить несколько **задач**, решение которых приведет к реализации поставленной цели работы:

- сбор и анализ характеристик одинарных осветительных приборов различных типов в лабораторных условиях;
- консолидация информации и анализ;
- составление перечня внешних факторов, влияющих на изменение коэффициента нелинейных искажений тока;

- экспериментальная проверка уровня их воздействия по изменению гармонических характеристик участка цепи;

- получение экспериментальных результатов.

Для формирования заключений и выводов предполагается использовать методы структурного, динамического и функционального анализа полученных результатов.

Определение основных характеристик и коэффициента нелинейных искажений электроприемников массового применения

При оценке спектрального состава ВГ различных осветительных приборов [23] было обнаружено, что K_I одного и того же электроприбора в различных условиях могут отличаться до 20 %, что позволило выдвинуть гипотезу о наличии зависимости K_I от ряда факторов, которые необходимо определить. От использования информации только из имеющихся в литературе материалов было решено отказаться, поскольку влияние на электросети осветительных приборов мало изучены из-за их малой мощности, сведения собраны в разных условиях эксплуатации и представлены разрозненно. На начальном этапе предстояло самостоятельно собрать данные по значениям K_I и основным характеристикам различных осветительных приборов в лабораторных условиях, чтобы использовать их в дальнейшем как изначальные сравнительные данные для анализа. В качестве эталонной локации выбрана лаборатория Казанского государственного энергетического университета с предельным уровнем коэффициента искажений напряжения от 2,0 до 2,8 %, а усредненным в рабочее время значением 2,4 %. Показания осветительных приборов регистрировались с помощью анализатора качества электрической энергии CIRCUTORAR-5.

Результаты основных и гармонических характеристик светодиодных ламп и светильников, различных люминесцентных ламп, ламп накаливания и электросети приведены в таблице 1. В отдельном столбце приведены рассчитанные значения гармонических составляющих тока нагрузки I_H в именованных единицах mA.

Как видно из таблицы, все осветительные приборы, в том числе линейные, обладают ненулевым коэффициентом нелинейных искажений тока нагрузки K_I . Это происходит из-за наличия хотя и не высокого, но определенного коэффициента нелинейных искажений напряжения в электросети K_U . Как и предполагалось, наименьшие значения K_I наблюдается у ламп накаливания, которое составляет менее 3 % и с ростом их мощности незначительно уменьшается. У светодиодных светильников, имеющих встроенные корректоры коэффициента мощности и ЛЛП с ЭМПРУ, значения K_I в располагаются в диапазоне 10...30 %. ЛЛП с ЭЛПРУ и КЛЛ имеют значения коэффициента нелинейных искажений в районе 85...100 %, т. е. нагрузка на сети их первой гармоники и высших гармоник примерно равны. Наибольшие значения коэффициента нелинейных искажений тока зафиксированы для светодиодных

ламп (СДЛ) и составляют 100...180 %. Среди результатов выделяются показатели лампы «Стандарт» с коэффициентом $K_I = 42,5$ %, что может информировать о нетипичной для светодиодных ламп характеристиках его драйвера. Наибольшая величина K_I зафиксирована у СДЛ Camelion и составляет 181 %. Значения гармонических составляющих тока нагруз-

ки I_H в именованных единицах мА, хотя напрямую связаны с K_I , но в первую очередь зависят от силы тока нагрузки, т. е. его мощности и коэффициента мощности. Оценка нелинейности светильников по I_H может быть информативна при необходимости сравнения электроприборов различного типа при значительных отличиях их характеристик.

Таблица 1. Основные характеристики различных осветительных электроприборов

Table 1. Main characteristics of various lighting electrical appliances

№	Нагрузка / Device	U , V	I , mA	P , Вт	PF	$\cos\phi$	K_U , %	K_I , %	I_H , mA
1	КЛЛ 1 13 Вт	233	85	13	-0,66	-0,91	2,2	96,4	81,9
2	КЛЛ 2 8 Вт	233	56	8	-0,68	-0,87	2,2	86,8	48,6
3	КЛЛ 3 15W	232	93	13	-0,65	-0,89	2,4	96,5	89,7
4	ЛЛП 2x18 с ЭЛПРУ	232	231	31	-0,59	-0,84	2,5	99,0	228,7
5	ЛЛП 2x18 с ЭМПРУ	232	416	50	0,52	0,51	2,5	10,3	42,8
6	СДЛ Gauss филимент	234	48	7	-0,67	-0,97	2,6	107,7	51,7
7	СДС Fereks DL 12W	230	254	12	-0,21	-0,21	2,3	29,4	74,7
8	СДС Fereks 150 W	230	661	147	-0,96	-0,99	2,2	11,8	78,0
9	СДЛ Ledel Sveteco 8	231	71	11	-0,73	-0,98	2,1	102,6	72,8
10	СДЛ Ecola 8,5 W	230	62	7	-0,54	-0,96	2,4	150,3	93,2
11	СДЛ Belligt 10 Вт	233	70	8	-0,52	-0,90	2,7	164,0	114,8
12	СДЛ ASD 11 Вт	233	80	9	-0,52	-0,97	2,3	161,0	128,8
13	СДЛ Эра 12 Вт	233	70	8	-0,51	-0,96	2,8	161,0	112,7
14	СДЛ Camelion 10 Вт	235	90	10	-0,48	-0,96	2,4	181,0	162,9
15	СДЛ Rexant 11,5 Вт	233	80	10	-0,55	-0,95	2,7	141,0	112,8
16	СДЛ Wolta 9 Вт	233	70	8	-0,50	-0,89	2,4	149,0	104,3
17	СДЛ Стандарт 10 Вт	234	100	9	-0,44	-0,45	2,7	42,5	42,5
18	СДЛ Онлайн 10 Вт	233	50	7	-0,61	-0,98	2,4	127,0	63,5
19	СДЛ Gauss 10 Вт	232	70	7	-0,46	-0,80	2,7	147,0	102,9
20	СДЛ Ergoluxe	234	64	8	-0,59	-0,93	2,1	124,3	79,5
21	СДЛ Verbatim	235	66	9	-0,63	-0,96	2,8	127,7	84,3
22	СДЛ ЭРА 5 Вт	236	50	5	-0,54	-0,98	2,0	171,2	85,6
23	СДЛ Generica 25 Вт	234	140	19	-0,58	-0,94	2,7	131,2	183,7
24	СДЛ Demmax	234	64	9	-0,64	-0,95	2,8	112,9	72,3
25	ЛН 40 Вт	232	180	42	1,00	1,00	2,4	2,6	4,7
26	ЛН 75 Вт	234	336	78	1,00	1,00	2,0	2,0	6,7
27	ЛН 150 Вт	231	622	144	1,00	1,00	2,3	2,1	13,1
28	ЛН 200 Вт	231	869	201	1,00	1,00	2,2	1,8	15,6
29	ЛН 500 Вт	231	2258	523	1,00	1,00	2,4	1,9	42,9
30	ЛН 1000 Вт	229	4478	1029	1,00	1,00	2,2	1,8	80,6

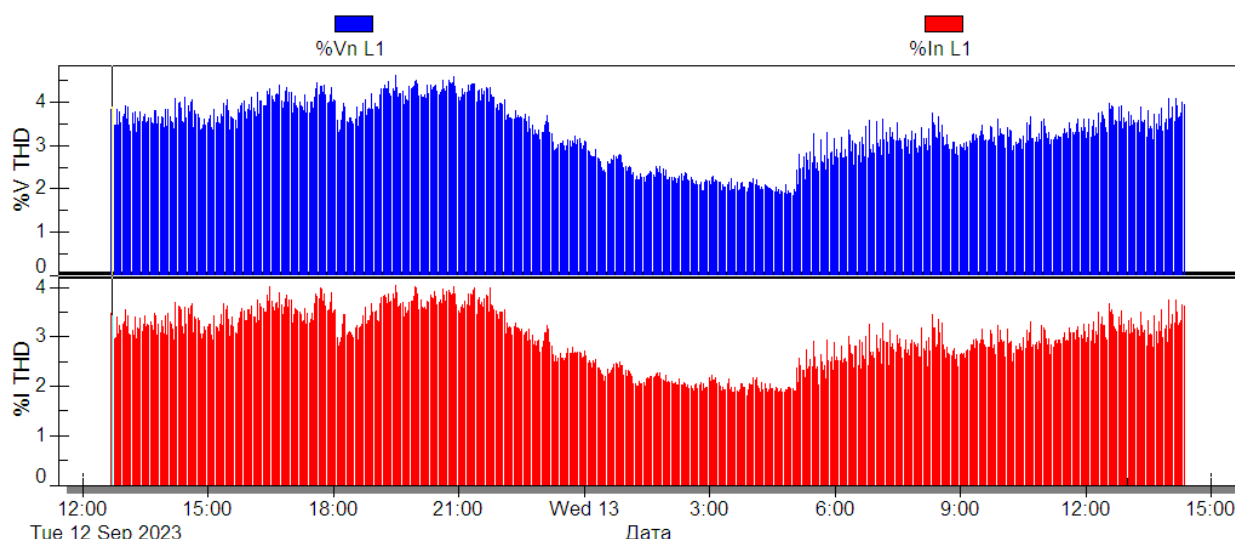
Источник: таблица составлена авторами на основе характеристик люминесцентных и светодиодных ламп и ламп накаливания.

Зависимость коэффициента нелинейных искажений тока K_I от различных факторов

К внешним факторам, которые могут влиять на значение коэффициента нелинейных искажений, можно отнести: качество электрической энергии в самой локальной электросети; наличие параллельно подключенных электроприборов, их количество и характеристики; параметры проводника электросети и уровень ее нагруженности; протяженность сети и др. Необходимо проверить на практике зависимость K_I от каждого из этих параметров, для чего запланировано проведение ряда испытаний с различными осветительными приборами.

Для оценки влияния качества электроэнергии в локальных сетях на значение коэффициента K_I , необхо-

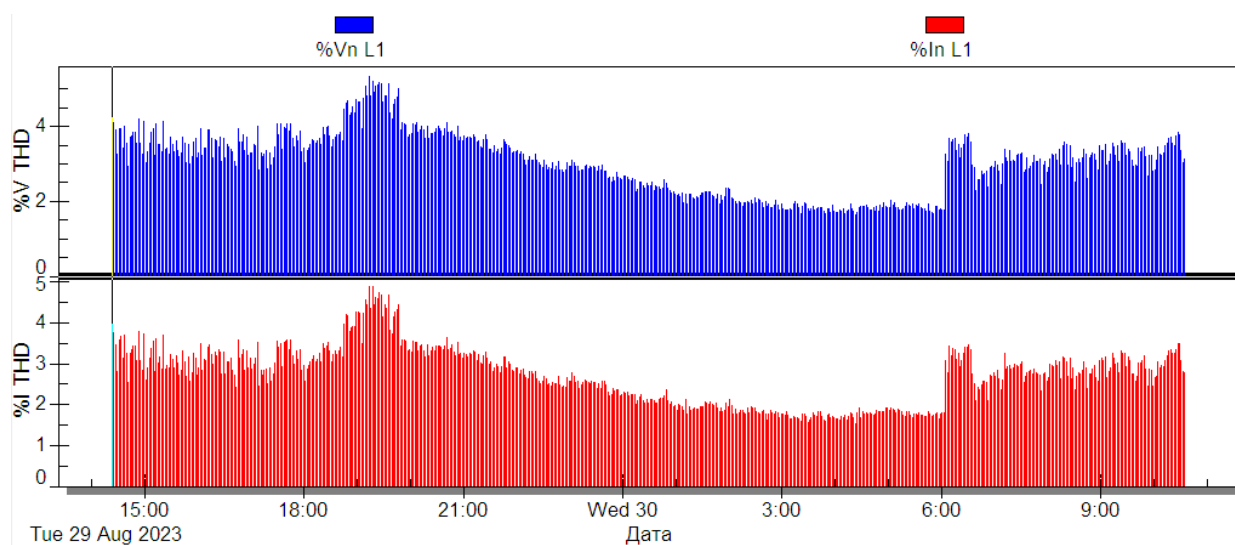
димо определить влияние несинусоидальности напряжения электросети, которую принято оценивать по показателю K_U . Известно, что коэффициент нелинейного искажения напряжения K_U в локальных низковольтных сетях изменяется в течение суток [24] и анализируя эти изменения, возможно выявить и описать зависимость K_I от K_U . Проведены суточные исследования параметров электросети с подключенной нагрузкой анализатором качества электрической энергии CIRCUTORAR-5 с шагом 2 минуты. В качестве нагрузки была выбрана лампа накаливания, поскольку для них значения K_I и K_U находятся примерно на одном уровне и будет удобно анализировать их графики одной размерности. Графики изменений K_I и K_U в течение суток представлены на рисунках 1 и 2.



Действие : 12.09.2023 12:41:45 Выбранная переменная: %Vn L1 Куда : 13.09.2023 14:22:00
 Действие : 0.0 (%V THD) Откуда : 12.09.2023 12:41:45 Максимум : 4.6 (%V THD) Минимум : 0.0 (%V THD)

Рис. 1. Характер суточных изменений K_U и K_I в условиях жилого комплекса

Fig. 1. The nature of daily changes in THD_U and THD_I in the conditions of a residential complex



Действие : 29.08.2023 14:22:35 Выбранная переменная: %Vn L1 Куда : 30.08.2023 10:36:00
 Действие : 0.0 (%V THD) Откуда : 29.08.2023 14:22:35 Максимум : 5.3 (%V THD) Минимум : 0.0 (%V THD)

Рис. 2. Характер суточных изменений K_U и K_I в частном жилом секторе

Fig. 2. The nature of daily changes in THD_U and THD_I in the private residential sector

Как видно из графиков, ни в одной локации не зафиксированы превышение максимального значения K_U нормируемого уровня 8 % и предельного уровня 12 %. Из рисунков видно, что для лампы накаливания графики K_I и K_U идентичны по форме и схожи по пределам, что демонстрирует наличие зависимости коэффициента нелинейных искажений тока от несинусоидальности напряжения. Для определения этой зависимости K_I от K_U были проведены эксперименты в лаборатории с доступными на практике различными осветительными приборами – светодиодными лампами Gauss, Camelion и Онлайт

мощностью 10 Вт, имеющие K_I в пределах 120...200 %, а также лампами накаливания мощностью 40 и 200 Вт с изначальными значениями K_I в пределах 1,7...5 %. Для удобства сравнительной оценки зависимости K_I от K_U различных осветительных электроприборов принято решение о приведении уровня K_I к коридору значений 5...10 %, чего возможно достигнуть параллельным подключением к ним нагрузок с линейными ВАХ: ламп накаливания различной мощности, электрических плиток, электропаяльников и др. В рамках эксперимента велась регистрация суточных показаний ос-

новых характеристик и значений K_I и K_U каждого выбранного электроприбора с интервалом 2 минуты в различных локациях и в разные дни недели. Испытания для первой нагрузки проводились троекратно в одной и той же локации. Сравнением полученных результатов продемонстрировало их идентичность и для последующих приборов было принято решение проводить одинарные испытания.

После оцифровки полученных массивов данных, содержащих до 700 показателей, проводился анализ, и определялись среднее значение K_I для каждого K_U с шагом 0,1 %: для граничных показаний K_U среднее значение K_I определялось из 3–5 показаний, а для наиболее частого значения $K_U = 2,5$ % количество показаний K_I достигало 54.

Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Усредненные значения зафиксированных в течение суток K_I различных нагрузок

Table 2. The average values of the various loads recorded during the day

K_I	Gauss +130 Вт	Онлайн + 130 Вт (выходной день)	Онлайн +130 Вт	Camelion +330 Вт	Онлайн +200 Вт	ЭРА 5 Вт + 150 Вт	Онлайн +240 Вт	Онлайн +275 Вт	ЛН 200 Вт	ЛН 40 Вт
	№ эксперимента / Experiment number									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,6	8,37	6,60	5,84	5,25	3,80	3,12	3,25	2,95	1,90	1,74
1,7	8,29	6,58	5,74	5,17	3,70	3,14	3,20	2,85	1,95	1,77
1,8	8,21	6,54	5,63	5,10	3,58	3,15	3,15	2,80	2,00	1,85
1,9	8,13	6,49	5,50	5,03	3,42	3,17	3,07	2,75	2,10	1,9
2,0	8,05	6,44	5,40	4,96	3,31	3,22	3,00	2,70	2,2	1,98
2,1	7,97	6,39	5,32	4,86	3,25	3,25	2,92	2,70	2,28	2,05
2,2	7,89	6,34	5,25	4,80	3,2	3,28	2,85	2,67	2,37	2,1
2,3	7,81	6,28	5,20	4,75	3,15	3,31	2,78	2,60	2,46	2,2
2,4	7,73	6,25	5,15	4,70	3,07	3,34	2,7	2,55	2,53	2,33
2,5	7,65	6,22	5,08	4,65	3,00	3,36	2,65	2,45	2,65	2,42
2,6	7,57	6,19	5,00	4,61	2,97	3,39	2,6	2,41	2,73	2,5
2,7	7,49	6,15	4,97	4,58	2,93	3,44	2,55	2,37	2,8	2,55
2,8	7,42	6,09	4,91	4,56	2,9	3,5	2,53	2,30	2,86	2,65
2,9	7,35	6,03	4,88	4,52	2,88	3,57	2,47	2,25	2,95	2,73
3,0	7,23	5,96	4,82	4,45	2,85	3,64	2,40	2,20	3,05	2,78
3,1	7,14	5,9	4,73	4,40	2,83	3,71	2,37	2,19	3,14	2,83
3,2	7,06	5,85	4,66	4,35	2,81	3,78	2,35	2,17	3,21	2,85
3,3	6,98	5,81	4,62	4,25	2,75	3,83	2,32	2,15	3,29	2,89
3,4	6,89	5,78	4,55	4,15	2,72	3,85	2,30	2,14	3,35	2,94
3,5	6,81	5,75	4,5	4,10	2,70	3,87	2,28	2,10	3,45	3,02
3,6	6,75	5,72	4,47	4,06	2,65	3,82	2,27	2,08	3,55	3,13
3,7	6,62	5,69	4,44	4,04	2,62	3,78	2,27	2,05	3,65	3,2
3,8	6,53	5,66	4,4	4,01	2,58	3,73	2,23	2,00	3,78	3,3
3,9	6,44	5,63	4,36	4,00	2,55	3,67	2,17	1,99	3,91	3,37
4,0	6,38	5,6	4,32	3,98	2,51	3,63	2,14	1,95	4,02	3,47
4,1	6,32	5,57	4,30	3,95	2,45	3,62	2,12	1,91	4,1	3,59
4,2	6,27	5,54	4,28	3,94	2,40	3,61	2,10	1,89	4,21	3,72
4,3	6,18	5,51	4,27	3,92	2,36	3,58	2,08	1,88	4,3	3,8
4,4	6,11	5,48	4,26	3,90	2,30	3,57	2,05	1,87	4,41	3,85
4,5	6,04	5,45	4,25	3,89	2,28	3,56	2,04	1,86	4,48	3,89
4,6	5,97	5,4	4,23	3,88	2,27	3,55	2,03	1,84	4,55	3,95
4,7	5,92	5,37	4,2	3,87	2,25	3,55	2,04	1,81	4,6	4,02
4,8	5,89	5,34	4,18	3,87	2,24	3,54	2,02	1,8	4,68	4,10
4,9	5,88	5,33	4,17	3,86	2,24	3,52	2,00	1,77	4,74	4,16

Источник: таблица составлена авторами по результатам проведенных экспериментов.

Графики зависимости K_I от K_U , построенные для десяти различных вариантов нагрузки по полученным результатам от проведенных экспериментов, представлены на рисунке 3. Кривые графика 1–8 построены для различных вариантов подключения СДЛ, шунтированных линейными нагрузками, кривые 9, 10 – для одинарных ламп накаливания.

Результаты исследований и графики зависимости K_I от K_U демонстрируют, что коэффициент нелинейных искажений тока K_I напрямую зависит от качества электрической энергии. И если при преобладании

в нагрузке линейной составляющей наблюдается прямая зависимость K_I от K_U , то для нелинейных электроприборов зависимость обратная. При изменении преобладания вида линейности составляющей в нагрузке, зависимость может поменяться, что наглядно демонстрирует кривая 6, построенная для маломощной светодиодной лампы 5 Вт с шунтированием ее лампой накаливания. С увеличением K_U с 1,5 до 3,5 % ее значение K_I растет как для линейного прибора, а далее нагрузка начинает вести себя как нелинейный потребитель, и кривая K_I начинает снижаться.

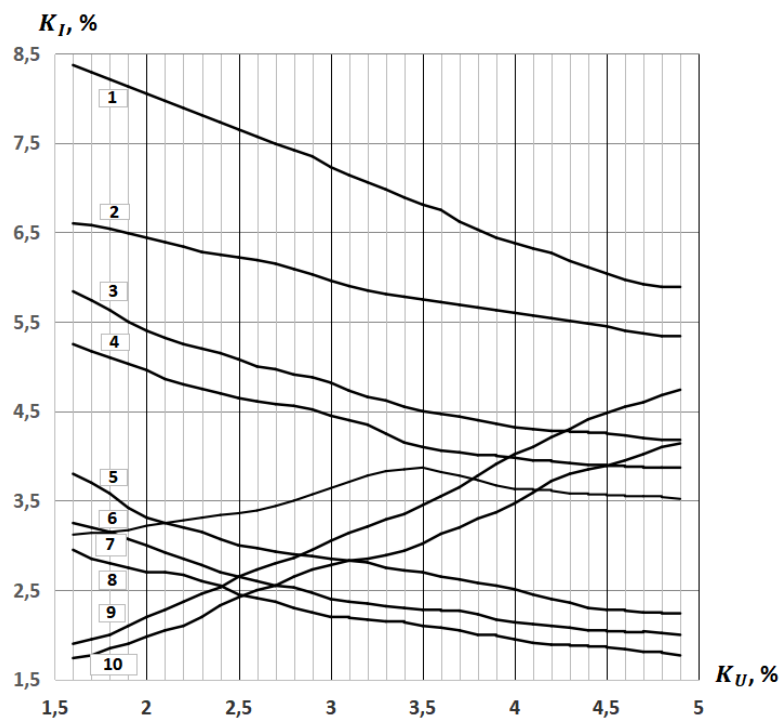


Рис. 3. График зависимости K_I от K_U для нелинейных (1–8) и линейных (9, 10) осветительных приборов

Fig. 3. Graph of the dependence of THD_U on THD_I for nonlinear (1–8) and linear (9, 10) lighting devices

Результаты экспериментов подтвердили наличие зависимости K_I от K_U , характеризующего качество электрической энергии. Согласно допускам нормативных требований коэффициент нелинейных искажений напряжения может достигать значения 8 %, а встречающийся на практике наименьший его уровень составляет 1 %. Соответственно, изменения K_I СДЛ могут достигать 3...5 % от изначальных как в сторону увеличения, так и уменьшения.

Предлагается ввести первый поправочный коэффициент – коэффициент несинусоидальности напряжения, обозначить его k_U и рассчитывать его по формуле

$$k_U = 1 + (K_{U_{\text{эталон}}} - K_U) / 100,$$

где K_U – фактический коэффициент нелинейности напряжения электросети, $K_{U_{\text{эталон}}}$ – эталонный коэффициент нелинейных искажений напряжения электросети лаборатории.

Известно, что вне зависимости от типа и площади сечения проводников с увеличением протяженности электросети в ней происходит падение напряжение. Соответственно, можно предположить, что в проводниках возможно самоподавление гармонических составляющих и снижение значения K_I в зависимости от удаленности источника эмиссии ВГ от точки замера. Для подтверждения выдвинутой гипотезы на территории жилого комплекса с уровнем K_U от 3,0 до 4,6 % были проведены эксперименты с СДЛ Camelion на разном удалении точки контроля от места подключения нагрузки.

Результаты представлены в таблице 3.

Обнаружено, что удаленность влияет на коэффициент нелинейных искажений тока в среднем на 1...2 % на каждые 100 метров. Соответственно, возникает второй поправочный коэффициент – коэффициент удаленности k_L , который необходимо учитывать при выборе места подключения ФКУ и при прогнозировании будущих влияний высших гармоник на осветительные сети. Предположительно, зависимость значения K_I от удаленности источника эмиссии от точки контроля скорее всего нелинейна и будет уменьшаться по мере их отдаления, взаимозависимость которых необходимо определить в будущих работах. На текущем этапе заключений возьмем наибольшее выявленное отклонение на уровне 2 % на каждые 100 метров электросети, что соответствует значению множителя 0,0002 в абсолютном значении. Данный коэффициент может быть только понижающим и рассчитывается по формуле

$$k_L = 1 - 0,0002L,$$

где L – фактическое расстояние от источника эмиссии до точки измерения или точки подключения ФКУ.

Общеизвестно, что подключение линейных приборов снижает коэффициент нелинейных искажений тока сети, т. е. происходит подавление ВГ током основной частоты. Для определения уровня подавления гармонических составляющих осветительных приборов линейными нагрузками был проведен ряд экспериментов с параллельным подключением СДЛ Camelion с лампами накаливания и электроплитами.

Изменение основных и гармонических характеристик, результаты эксперимента зафиксированы в таблице 4.

Таблица 3. Зависимость значения K_I от удаленности точки контроля от источника эмиссии ВГTable 3. The dependence of the THD_I value on the distance of the control point from the source of VG emissions

№ эксп. / Exp. number	$K_U, \%$	$K_I, \%, 0,1 \text{ м}$	$K_I, \%, 20 \text{ м}$	$K_I, \%, 50 \text{ м}$	$K_I, \%, 100 \text{ м}$
1	3,0	–	–	–	–
2	3,1	161,0	160,3	–	–
3	3,2	158,4	162,9	162,4	162,1
4	3,3	157,9	161,3	161,1	161,2
5	3,4	157,7	160,9	160,7	160,3
6	3,5	157,4	159,4	160,9	163,4
7	3,6	157,2	154,1	160,1	159,1
8	3,7	156,9	157,4	161,3	156,4
9	3,8	156,5	158,7	156,8	155,3
10	3,9	154,0	156,8	154,2	154,7
11	4,0	153,8	151,7	152,4	154,8
12	4,1	157,3	146,8	150,8	151,2
13	4,2	153,3	147,9	149,0	148,9
14	4,3	153,4	144,7	147,1	147,3
15	4,4	146,4	144,2	144,6	148,4
16	4,5	146,1	146,3	146,0	148,1
17	4,6	145,5	–	–	–

Источник: таблица составлена авторами на основе результатов экспериментов с СДЛ Camelion.

Таблица 4. Основные характеристики подавления ВГ СДЛ различными линейными нагрузками

Table 4. The main characteristics of the suppression of HH LED-lamps by various linear loads

№ эксп. / Exp. number	Нагрузка / Device	$I, \text{ мА}$	$P, \text{ Вт}$	PF	$\cos\phi$	$K, \%$	$K_I, \%$	$I_H \text{ изм.}, \text{ мА}$	$I_H \text{ расч.}, \text{ мА}$	$\Delta I_H, \text{ мА}$	$\Delta I_H, \%$
1	Camelion 10 Вт	90	10	-0,48	-0,96	2,4	180	162,0	–	–	–
2	Camelion + ЛН 40 Вт	233	50	-0,95	-0,99	2,4	37,4	87,1	167,9	80,8	48
3	Camelion + ЛН 65 Вт	332	74	-0,97	1,00	2,4	24	79,7	169,1	89,4	53
4	Camelion + ЛН 200 Вт	915	212	-0,99	1,00	2,4	8,6	78,7	178,5	99,8	56
5	Camelion + плитка 330 Вт	1446	336	1,00	1,00	2,4	5,8	83,9	200,8	116,9	58
6	Camelion + ЛН 500 Вт	2309	536	1,00	1,00	2,4	3,8	87,7	205,8	118,1	57
7	Camelion + ЛН 1000 Вт	4525	1042	1,00	1,00	2,3	2,6	117,7	243,5	125,8	52

Источник: таблица составлена авторами на основе результатов экспериментов с СДЛ Camelion и ламп накаливания.

Анализ подавления высших гармоник только по изменению коэффициента нелинейных искажений тока не всегда достоверен, так как K_I снижается значительно, иногда даже на порядок, но при этом возрастает суммарная сила тока общей нагрузки, соответственно, и значение гармонических составляющих в именованных единицах I_H . По их значению необходимо анализировать уровень ВГ и степень их снижения. Сравнение только K_I демонстрирует, что с увеличением мощности шунтирующей нагрузки идет его уменьшение, и при шунтировании ЛН 1000 Вт значение опускается до 2,6 %, что демонстрирует подавление на 97,4 %. Однако изменение в именованных единицах ΔI_H для этой же нагрузки составляет 52 %, а максимальный уровень подавления до 58 % при шунтировании линейной нагрузкой на уровне 30...55кратно мощности СДЛ.

Оценка подавления гармонических составляющих СДЛ линейными электроприборами по K_I справедлива для электроприборов с одинаковой мощностью. Если мощность отличается более чем на 25, необходимо оценивать по другим параметрам, например по I_H . Учитывая, что линейные электроприборы редко бывают одинаковой мощности, метод прогнозирования по K_I при подключении

к осветительной сети с нелинейными осветительными приборами линейных электроприборов малопригоден.

Для проверки уровня взаимного подавления гармонических составляющих нелинейных электроприборов были проведены повторные эксперименты для СДЛ в лаборатории КГЭУ в дневное время. Из-за совпадения времени испытания с моментом пиковых нагрузок результаты одинарных ламп незначительно отличаются от показаний в таблице 1. Взаимоподавление будем оценивать по снижению K_I и по значениям высших гармоник тока нагрузки I_H в именованных единицах мА. После сравнения результатов будет понятно, достоверен метод или нет.

Результаты экспериментов взаимоподавления высших гармоник нескольких СДЛ представлены в таблице 5.

Сравнение результатов экспериментов двух СДЛ с одинаковой мощностью 10 Вт (строки 1 + 2) с результатом их совместного подключения (строка 13) показывает, что при совместном подключении их $K_I = 132,2 \%$, а среднеарифметическое значение, полученное расчетным путем, равно 148,4 %, что отличается на 12 %. При переводе гармонических искажений нагрузки в именованные единицы разница

значений одинарного и группового подключения составляет 11 %, что практически такое же, а разницу можно отнести к погрешности измерений. Для остальных моделей СДЛ сравнение взаимоподавления по значениям K_I и I_H также отличаются незначительно. Соответственно, оценка взаимоподавления по коэффициенту K_I справедлива для приборов схожего уровня мощности и может использоваться при прогнозировании реальной гармонической нагрузки на сети освещения при проектировании. В случае разли-

чий мощности более чем на 20 % необходимо применять иные методы контроля, например, по значению гармонических составляющих в именованных единицах I_H или уровню суммарного гармонического тока на единицу активной мощности. Из-за отличий филаментных ламп от классических СДЛ по характеристикам и природе нелинейности его параметры взаимоподавления также отличаются, и для составления правильной взаимозависимости для филаментных ламп необходимо проводить отдельные исследования.

Таблица 5. Основные характеристики СДЛ при одинарном и групповом подключении

Table 5. Main characteristics of LED-lamps with single and group connection

№ эксп. / Exp. number	Название / Device	I , mA	P , Вт	PF	$\cos\varphi$	K_{U_i} , %	K_{I_i} , %	Сред. K_{I_i} , %	ΔK_{I_i} , %	I_H изм., mA	I_H расч., mA	ΔI_H , mA	ΔI_H , %
1	Camelion (C)	80	10	-0,55	-0,96	2,7	164,3	-	-	131,44	-	-	-
2	InHome (I)	73	10	-0,62	-0,97	2,7	132,5	-	-	96,73	-	-	-
3	Gauss (G)	60	7	-0,56	-0,8	2,8	142,7	-	-	85,62	-	-	-
4	Verbatium (V)	64	9	-0,61	-0,96	2,6	122,1	-	-	78,14	-	-	-
5	ЭРА (Э)	62	8	-0,58	-0,96	2,6	157,4	-	-	97,59	-	-	-
6	Rexant (R)	75	10	-0,6	-0,95	2,7	138,5	-	-	103,88	-	-	-
7	ASD (A)	68	9	-0,61	-0,97	2,6	157,9	-	-	107,37	-	-	-
8	Bellight (B)	66	8	-0,58	-0,96	2,6	163,4	-	-	107,84	-	-	-
9	Ergoluxe (E)	66	8	-0,59	-0,92	2,6	124,8	-	-	82,37	-	-	-
10	Wolta (W)	68	8	-0,57	-0,9	2,6	146,9	-	-	99,89	-	-	-
11	Demmax (D)	64	9	-0,64	-0,95	2,8	112,1	-	-	71,74	-	-	-
12	Gauss филамент (G.f)	48	7	-0,67	-0,97	2,6	105,4	-	-	50,59	-	-	-
13	C+I (1+2)	153	20	-0,59	-0,97	2,7	132,2	148,4	12	202,27	228,17	25,90	11
14	C+G (1+3)	140	18	-0,56	-0,91	2,8	130,1	153,5	18	182,14	217,06	34,92	16
15	C+V (1+4)	140	19	-0,59	-0,96	2,8	124	143,2	15	173,60	209,58	35,98	17
16	C+Э (1+5)	136	18	-0,59	-0,96	2,7	131,1	160,9	23	178,30	229,03	50,73	22
17	C+R (1+6)	145	20	-0,61	-0,96	2,9	123,5	151,4	23	179,08	235,32	56,24	24
18	C+D (1+11)	130	19	-0,62	-0,96	2,7	119,4	138,2	16	155,22	203,18	47,96	24
19	C+G.f (1+12)	128	17	-0,59	-0,96	2,7	131,4	134,9	3	168,19	182,03	13,84	8
20	C+I+G (1+2+3)	211	28	-0,58	-0,94	2,7	125,5	146,5	17	264,81	313,79	48,98	16
21	C+I+V (1+2+4)	217	30	-0,6	-0,97	2,7	123,3	139,6	13	267,56	306,31	38,75	13
22	C+I+Э (1+2+5)	210	29	-0,6	-0,97	2,8	127,4	151,4	19	267,54	325,75	58,21	18
23	I+D+G.f (2+11+12)	178	27	-0,66	-0,97	2,8	105	116,7	11	186,90	219,06	32,16	15
24	C+I+G+V (1+2+3+4)	272	37	-0,6	-0,94	2,7	122,1	140,4	15	332,11	391,93	59,82	15
25	C+I+G+Э (1+2+3+5)	266	36	-0,59	-0,94	2,7	118,9	149,2	26	316,27	411,37	95,10	23
26	C+I+G+V+Э (1+2+3+4+5)	330	46	-0,59	-0,95	2,7	121,8	143,8	18	401,94	489,52	87,58	18
27	C+I+G+V+Э+R	394	56	-0,6	-0,95	2,6	117,1	142,9	22	461,37	593,39	132,02	22
28	C+I+G+V+Э+R+A	468	65	-0,6	-0,95	2,9	118,8	145,1	22	555,98	700,76	144,78	21
29	C+I+G+V+Э+R+A+B	530	75	-0,61	-0,95	2,8	120,8	147,4	22	640,24	808,61	168,37	21
30	C+I+G+V+Э+R+A+B+E	575	84	-0,62	-0,95	2,6	112,9	144,8	28	649,18	890,98	241,80	27
31	C+I+G+V+Э+R+A+B+E+W	640	92	-0,61	-0,95	2,7	115,4	145,1	26	738,56	990,87	252,31	25
32	C+I+G+V+Э+R+A+B+E+W+D	695	101	-0,62	-0,97	2,9	112,8	142,1	26	783,96	1062,61	278,65	26
33	Все 12	735	109	-0,63	-0,97	2,7	110,8	139,0	25	814,38	1113,20	298,82	27

Источник: таблица составлена авторами по результатам экспериментов взаимоподавления высших гармоник нескольких СДЛ.

Результатами экспериментального исследования подтверждено, что взаимное подавление нелинейных осветительных приборов возрастает с увеличением количества подключаемых электроприборов и может достигать 25 % для десяти устройств. Влияние взаимного подавления необходимо зафиксировать третьим коэффициентом – коэффициентом взаимоподавления, обозначенным как k_N , который можно рассчитать по формуле

$$k_N = 1 - k_n / 100,$$

где k_n – показатель взаимного подавления из столбца 10 таблицы 5, который зависит от типа и количества подключаемых параллельно осветительных приборов. Углубленное изучение взаимного влияния различных электроприборов будет продолжено в ходе последующих работ для выявления природы зависимости и их закономерностей.

Метод прогнозирования уровня гармонических составляющих электросети по значениям коэффициента нелинейных искажений тока осветительных приборов и поправочных коэффициентов

Анализ экспериментальных результатов коэффициентов нелинейных искажений тока различных осветительных электроприборов в условиях влияния различных внешних факторов позволяет достоверно предсказать будущие гармоники в осветительных сетях, что дает возможность сформировать новый метод прогнозирования ожидаемого тока высших гармоник для участка сети освещения с несколькими нелинейными осветительными приборами с достаточно высокой точностью. Оптимальным условием применения данного метода являются сценарий при оценке влияния на сети освещения гармонических составляющих нескольких однотипных осветительных приборов или светильников со схожими характеристиками мощности и $\cos\varphi$.

Данный метод сводится к формуле расчета ожидаемого уровня гармонических составляющих, зависящего от количества подключаемых к сети освещения осветительных приборов, их начальных значений K_I , параметров качества электроэнергии в присоединяющих линию освещения электросетях, его протяженности и взаимной удаленности электроприборов. Показатели качества электроэнергии возможно запросить у снабжающей организации, по которым не составит труда рассчитать коэффициент несинусоидальности напряжения k_U . Количество и модели светильников, их взаимное удаление и протяженность осветительной сети определяются по светотехническому расчету и проектными решениями, по которым возможно вычислить коэффициент взаимоподавления k_N и коэффициент удаленности k_L . Значения K_I каждого осветительного прибора можно получить из паспортных данных изделий или запросить у производителей дополнительную информацию, например протоколы лабораторных исследований.

По полученным вводным данным можно рассчитать прогнозируемое значение реального коэффициента нелинейных искажений тока для сети освещения по формуле

$$K_{I\text{н.ц}} = k_U k_L k_N K_I.$$

Благодаря расчету можно спрогнозировать реальный уровень гармонических составляющих будущих сетей освещения и при необходимости сразу заложить в проект ФКУ. Согласно расчетам, снижение коэффициента нелинейных искажений тока на реальном участке цепи может достигать до 35 %, соответственно, можно запланировать применение ФКУ с упрощенными параметрами. Указанные в работе допустимые величины поправочных коэффициентов выбраны с учетом выявленных в ходе экспериментов их максимальных значений и скорее всего подлежат корректировке по мере их углубленного изучения в последующих работах. Однако уже на данной стадии проработки предложенный метод впервые поз-

воляет на этапе проектирования прогнозировать реальный уровень гармонических нагрузок с погрешностью не более 15...20 %, что достаточно для выбора фильтр-компенсирующих устройств. Расширение применения метода и повышение точности его результатов с их валидацией возможно в ходе последующих работ с выполнением новых экспериментальных испытаний и всесторонним анализом полученных результатов для выявления природы и характера зависимости и составления их формул.

Выводы

Предложенный метод прогнозирования уровня гармонических составляющих ориентирован на разработку инженерных решений по снижению негативного влияния высших гармоник на сети освещения по характеристикам подключаемых осветительных электроприборов на этапе проектирования. Для правильного подбора оптимальных решений по компенсации негативных влияний гармонических составляющих заранее важно знать не только характеристики осветительных приборов по отдельности, но и понимать факторы, которые могут оказывать влияние на их суммарный уровень, к которым можно отнести несинусоидальность напряжения электросети, протяженность сети освещения, количество и характеристики параллельно подключенных электроприборов.

Цель исследования, заключающаяся в выявлении зависимости коэффициента нелинейных искажений тока осветительных электроприборов от различных параметров и разработке универсального метода прогнозирования реального уровня гармонических составляющих для сетей освещения по их значению, достигнута.

Анализ результатов экспериментов показал, что на практике встречается множество факторов, влияющих на уровень эмиссии гармонических составляющих осветительными приборами в сети освещения, степень воздействия которых можно обнаружить по значениям коэффициента нелинейных искажений тока, выдаваемых основным большинством анализаторов качества электроэнергии на этапе контроля электроприборов нормативным требованиям и мониторинга состояния электросетей.

Для прогнозирования их влияния на сети освещения при проектировании, предложена формула расчета возможного уровня гармонических составляющих участка цепи и введение в литературу поправочных коэффициентов: коэффициента удаленности, коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициента взаимоподавления.

При этом на практике встречаются осветительные приборы с нетиповым для большинства светильников характеристиками нелинейности. В этом случае, а также при наличии в сетях освещения электроприемников различной природы нелинейности или значительных отличиях в мощности для определения и прогнозирования уровня влияния их высших гармоник на электросети анализ только коэффициента нелинейных искажения тока K_I будет недостаточным. Необходимо оценивать другие параметры,

например, значение искажения тока нагрузки в имеванных единицах I_H .

Предложенный метод применим не только для осветительных приборов, но и для прогнозирования уровня гармонического влияния на электросети электрооборудования с нелинейными ВАХ других видов. Дальнейшее развитие исследований может быть связано с углубленным анализом каждого фактора, влияющего на уровень гармонических составляющих в локальных сетях, определению закономерностей по их воздействию и выявлению взаимосвязанных характеристик, анализ которых на этапе проектирования электроснабжения позволит с большей достоверностью прогнозировать будущее состояние качества электроэнергии в локальных низковольтных электросетях.

Библиографические ссылки

1. Nestyorkina N.P., Zhuravlyova Yu.A., Kovalenko O.Y., Mikayeva S.A. (2020) Comparative Analysis of the Characteristics of LED Filament Lamps for Household Lighting. *Light & Engineering*, vol. 28, no. 6, pp. 71-75. DOI: 10.33383/2020-023
2. ANSI/IES TM-28-20. Projecting Long-Term Luminous Flux Maintenance of LED Lamps and Luminaires. New York: Illuminating Engineering Society, 2020 (Technical Memorandum).
3. Ayaz M., Yucel U., Erhan K., Ozdemir E. (2020) A Novel Cost-Efficient Daylight-Based Lighting System for Public Buildings: Design and Implementation. *Light & Engineering*, vol. 28, no. 6, pp. 60-70. DOI: 10.33383/2020-043
4. Кузьменко В. П. Модель оценки срока службы светодиодных осветительных приборов с учетом системных факторов эксплуатации // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 4. С. 12–21. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-12-21
5. Aurora G., Sarah K.R., Math H.J. (2017) Light Intensity Variation (Flicker) and Harmonic Emission Related to LED Lamps. *Electric Power Systems Research*, vol. 146, no. 5, pp. 107-114. DOI:10.1016/J.EPSR.2017.01.026
6. Тукиаитов П. Х. К характеристике закономерности спада светового потока светодиодных филаментных ламп разной мощности после их включения // Практическая силовая электроника. 2018. № 2. С. 49–52.
7. Radwa M.A., Carl N.M.H. (2021) Characterization of Commercial LED Lamps for Power Quality Studies. *IEEE Canadian J. of Electr. and Comp. Eng.*, vol. 44, no. 2, pp. 94-104. DOI:10.1109/ICJECE.2019.2951031
8. Kurker F, Nur A. (2025) Reduction of Harmonics from LED Lighting in Industrial Facilities with Passive LC Filter. *Light & Engineering*, vol. 33, no. 5, pp.79-88. DOI: 10.33383/2025-081
9. Тукиаитов П. Х., Зарипов П. К. Определение коэффициента мощности искажения нагрузок по номограмме на основе измерения КНИ по току // Практическая силовая электроника. 2022. № 4 (88). С. 53–55
10. Chakraborty S., Chakraborty G., Goswami A.D., Roy J. (2023) Study of the Harmonic Analysis of the High-Intensity Discharge Lamps. *L&E*, vol. 31, no. 4. DOI: 10.33383/2022-093
11. Sonmezocak T., Akar O., Terzi U.K. (2022) High Performance Adaptive Active Harmonic Filter Design for Non-Linear LED Loads. *L&E*, vol. 30, no. 1. DOI:10.33383/2021-083
12. Rustemli S., Satici M.A., Sahin G., Sark W.V. (2023) Investigation of Harmonics Analysis Power System Due to Non-Linear Loads on the Electrical Energy Quality Results. *Energy Reports*, vol. 10, pp. 4704-4732. DOI: 10.1016/J.EGYR.2023.11.034
13. Колмаков В. О., Пантелеев В. И. Качество электроэнергии в системах светодиодного освещения // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования. 2012. С. 87–90.
14. Бирюлин В. И., Куделина Д. В., Брежнев И. В. Исследование проблем качества электроэнергии в сетях напряжением 0,4 кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 2. С. 73–85. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86
15. Akalp O., Ozbay H., Efe S.B. (2021) Design and Analysis of High-Efficient Driver Model for LED Luminaires. *Light & Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 96-106. DOI:10.33383/2021-012
16. Кузьменко В. П., Солёный С. В., Фролов Е. А., Бобрышов А. П. Структурно-функциональная модель управления качеством светодиодных источников света, используемых в малых космических аппаратах // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 1. С. 35–43. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-35-43
17. Hasan A., Abdulmajeed S., Fahad A., Kiss P. (2023) Numerical Harmonic Modelling of Low Wattage LED Lamps Based on Parameter Estimation Algorithms. *ISA Transactions*, vol. 139, pp. 230-241. DOI: 10.1016/J.ISATRA.2024.09.016
18. Özer İ., Özbay H., Efe S.B. (2022) Deep Learning Based Harmonic Estimation in LED Illumination Systems. *Journal of Eng. Sciences and Research*, vol. 4, no. 2, pp. 328-334. DOI: 10.46387/BJESR.1174771
19. Arrillaga J., Bradley D., Bodger P. (1985) *Power System Harmonics*. New York, USA: J. Wiley & Sons.
20. Горбунов А. О. Потери мощности от несинусоидальных токов в сельских электрических сетях 0,4 кВ // Вестник аграрной науки Дона. 2025. Т. 18, № 2 (70). С. 67–78. DOI: 10.55618/20756704_2025_18_2_67-78
21. Тухватуллин Л. Т., Исаков П. Г. Способы повышения стабильности напряжения в системе электроснабжения промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27, № 3. С. 82–101. DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-82-101
22. Tukshaitov R., Zarirov R., Gibadullin R. (2023) Some factor constraining the development and implementation of power grid voltage harmonics in the power engineering of filter-compensating installation - E3S Web of Conferences 470, p. 01023. DOI: 10.1051/e3sconf/202347001023
23. Тукиаитов П. Х., Зарипов П. К. Спектральный состав тока разных нагрузок и анализ эффективности снижения эмиссии его гармоник в электросеть // Практическая силовая электроника. 2024. № 3 (95). С. 37–41.
24. Тукиаитов П. Х., Зарипов П. К. Метрологическое обеспечение измерения малых значений коэффициента нелинейных искажений электрооборудования на основе физического его моделирования // Практическая силовая электроника. 2024. № 4 (96). С. 52–55.

References

1. Nestyorkina N.P., Zhuravlyova Yu.A., Kovalenko O.Y., Mikayeva S.A. (2020) Comparative Analysis of the Characteristics of LED Filament Lamps for Household Lighting. *Light & Engineering*, vol. 28, no. 6, pp. 71-75. DOI: 10.33383/2020-023
2. ANSI/IES TM-28-20. Projecting Long-Term Luminous Flux Maintenance of LED Lamps and Luminaires. New York: Illuminating Engineering Society, 2020 (Technical Memorandum).
3. Ayaz M., Yucel U., Erhan K., Ozdemir E. (2020) A Novel Cost-Efficient Daylight-Based Lighting System for

Public Buildings: Design and Implementation. *Light & Engineering*, vol. 28, no. 6, pp. 60-70. DOI: 10.33383/2020-043

4. Kuzmenko V.P. (2025) [A model for estimating the service life of LED lighting devices taking into account system factors of operation]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 4, pp. 12-21. (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2025-4-12-21

5. Aurora G., Sarah K.R., Math H.J. (2017) Light Intensity Variation (Flicker) and Harmonic Emission Related to LED Lamps. *Electric Power Systems Research*, vol. 146, no. 5, pp. 107-114. DOI:10.1016/J.EPSR.2017.01.026

6. Tukshaitov R.H. (2018) [To characterize the patterns of decrease in the luminous flux of LED filament lamps of different power after they are turned on]. *Practical Power Electronics*, no. 2, pp. 49-52 (in Russ.).

7. Radwa M.A., Carl N.M.H. (2021) Characterization of Commercial LED Lamps for Power Quality Studies. *IEEE Canadian J. of Electr. and Comp. Eng.*, vol. 44, no. 2, pp. 94-104. DOI:10.1109/ICJECE.2019.2951031

8. Kurker F., Nur A. (2025) Reduction of Harmonics from LED Lighting in Industrial Facilities with Passive LC Filter. *Light & Engineering*, vol. 33, no. 5, pp.79-88. DOI: 10.33383/2025-081 DOI: 10.33383/2025-081

9. Tukshaitov R.Kh., Zaripov R.K. (2022) [Determination of the load distortion power factor according to a nomogram based on the measurement of the DC current]. *Practical Power Electronics*, no. 4 (88), pp. 53-55 (in Russ.).

10. Chakraborty S., Chakraborty G., Goswami A.D., Roy J. (2023) Study of the Harmonic Analysis of the High-Intensity Discharge Lamps. *L&E*, vol. 31, no. 4. DOI: 10.33383/2022-093

11. Sonmezocak T., Akar O., Terzi U.K. (2022) High Performance Adaptive Active Harmonic Filter Design for Non-Linear LED Loads. *L&E*, vol. 30, no. 1. DOI:10.33383/2021-083

12. Rustemli S., Satici M.A., Sahin G., Sark W.V. (2023) Investigation of Harmonics Analysis Power System Due to Non-Linear Loads on the Electrical Energy Quality Results. *Energy Reports*, vol. 10, pp. 4704-4732. DOI:10.1016/J.EGYR.2023.11.034

13. Kolmakov V.O., Pantelev V.I. (2012) [The quality of electricity in LED lighting systems]. *Electricity: from Generation and Distribution to Efficient Use*, pp. 87-90 (in Russ.).

14. Biryulin V.I. Kudelina D.V. Brezhnev I.V. (2022) [Investigation of electricity quality problems in 0.4 kV networks]. *News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*,

vol. 24, no. 2, pp. 73-85 (in Russ.). DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86

15. Akalp O., Ozbay H., Efe S.B. (2021) Design and Analysis of High-Efficient Driver Model for LED Luminaires. *Light & Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 96-106. DOI:10.33383/2021-012

16. Kuzmenko V.P., Solenyi S.V., Frolov E.A., Bobryshov A.P. (2026) [Structural and functional model of quality management of LED sources light used in small spacecraft]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 1, pp. 35-43. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-35-43 (in Russ.).

17. Hassan A., Abdulmajid S., Fahad A., Kiss P. (2023) [Numerical harmonic modeling of low-power LED lamps based on parameter estimation algorithms]. *ISA Transactions*, vol. 139, pp. 230-241 (in Russ.). DOI: 10.1016/j.isatra.2024.09.016

18. Özer İ., Özbay H., Efe S.B. (2022) Deep Learning Based Harmonic Estimation in LED Illumination Systems. *Journal of Eng. Sciences and Research*, vol. 4, no. 2, pp. 328-334. DOI: 10.46387/bjesr.1174771

19. Arrillaga J., Bradley D., Bodger P. (1985) Power System Harmonics. New York, USA: *J. Wiley & Sons*.

20. Gorbunov A.O. (2025) Power losses from non-sinusoidal currents in rural electrical networks of 0.4 kV. *Vestnik of Agrarian Science of the Don*, vol. 18, no. 2 (70), pp. 67-78 (in Russ.). DOI: 10.55618/20756704_2025_18_2_67-78

21. Tukhvatullin L.T., Isakov R.G. (2025) [Ways to increase voltage stability in the power supply system of industrial enterprises]. *News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, vol.27, no. 3, pp.82-101 (in Russ.).

22. Tukshaitov R., Zaripov R., Gibadullin R. (2023) Some factor constraining the development and implementation of power grid voltage harmonics in the power engineering of filter-compensating installation - E3S Web of Conferences 470, p. 01023. DOI: 10.1051/e3sconf/202347001023

23. Tukshaitov R.H., Zaripov R.K. (2024) [Spectral composition of the current of various loads and analysis of the effectiveness of reducing the emission of its harmonics into the power grid]. *Practical Power Electronics*, no. 3 (95), pp. 37-41 (in Russ.).

24. Tukshaitov R.H., Zaripov R.K. (2024) [Metrological support for measuring small values of the coefficient of nonlinear distortion of electrical equipment based on its physical modeling]. *Practical Power Electronics*, no. 4 (96), pp. 52-55 (in Russ.).

A Method for Predicting the Level of Lighting Network Harmonic Components in Terms of the Coefficient of Nonlinear Current Distortion of Lighting Electrical Appliances with Respect to the External Factor Effects

R.K. Zaripov, Post-graduate, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

A.E. Sidorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

The article is devoted to the analysis of relations between the level of harmonic current components in local low-voltage lighting networks and the initial parameters of lighting devices of various types connected to it and various external factors. The purpose of the research is to study the relation of the initial nonlinear current distortion coefficient of lighting electrical appliances with respect to various parameters and develop a universal method for predicting the real level harmonic components for a circuit portion based on these values. The paper presents the results of experimental measurements of main characteristics and coefficients of nonlinear current distortion of various linear and nonlinear lighting devices. The relation between their values and a number of external factors has been studied: the total power grid load, the time of day, the power grid non-sinusoidal voltage, the distance to the source of higher harmonics emission from the control point and various types of electrical appliances connected in parallel to the power grid. As a solution, a formula for calculating the predicted level of harmonic components of the lighting network with correction coefficients for each practical case providing prediction the level of possible power grid loads based on laboratory values of lighting devices and selection effective solutions to maintain electricity quality at minimal cost is proposed. It is suggested to call correction coefficients as the "distance coefficient" responsible for distance correction of the connection point of special filter-compensating installations (FCS) from the source of higher harmonic emission, the "non-sinusoidal voltage coefficient" that takes into account the current state of sinusoidal voltage in the network, and the "mutual reduction coefficient", which approximates the objectivity of estimating the total harmonic components of a circuit section by the coefficient nonlinear current distortion of each device. The results obtained make it possible to predict the actual level of harmonic loads of local lighting net-

works based on the parameters of the connected lighting devices and the characteristics of the power grid for the selection of optimal filter-compensating installations reliably.

Keywords: nonlinear load, coefficient of nonlinear current distortion, higher harmonics, harmonic component of current, power grid, filter-compensating installation.

Получено 10.04.2026

Образец цитирования

Зарипов Р. К., Сидоров А. Е. Метод прогнозирования уровня гармонических составляющих в сетях освещения по значению коэффициента нелинейных искажений тока осветительных электроприборов с поправкой на внешние факторы // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 2. С. 86–97. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-2-86-97

For Citation

Zaripov R.K., Sidorov A.E. (2026) [A Method for Predicting the Level of Lighting Network Harmonic Components in Terms of the Coefficient of Nonlinear Current Distortion of Lighting Electrical Appliances with Respect to the External Factor Effects]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 2, pp. 86-97. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-2-86-97 (in Russ.).