МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В ТРЁХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНОГО ФИЛЬТРА

Амурова Наталья Юрьевна,
Исполняющий обязанности доцента кафедры “Системы энергообеспечения”
Ташкентского университета информационных технологий
DOI: 10.67620/yoshlarvailm.0340006

Аннотация. Рассматривается задача снижения гармонических искажений в трёхфазных электрических сетях, питающих нелинейные нагрузки, включая светодиодные осветительные устройства и силовые электронные преобразователи. Цель исследования - оценить распределение гармонических составляющих по фазам и определить условия применения многоветвевого пассивного фильтра для уменьшения искажений тока. В качестве исходной основы использованы приведённые в исследуемой работе результаты измерений, согласно которым коэффициент искажения тока составляет 7,96 % в фазе А, 14,72 % в фазе В и 10,05 % в фазе С. Различие значений указывает на неодинаковый уровень гармонических искажений в фазах и обосновывает необходимость дифференцированной оценки режимов сети. Рассматривается применение пассивного фильтра с резонансными ветвями, рассчитанными на подавление третьей, пятой, седьмой и девятой гармоник.

Ключевые слова: качество электрической энергии, гармонические искажения тока, высшие гармоники, трёхфазная электрическая сеть, нелинейная нагрузка.

Annotatsiya. Ushbu maqolada LED yoritiş qurilmalari va kuç elektronika özgartkiçlari kabi noçiziqli yuklamalarni elektr energiyasi bilan ta’minlovçi uç fazali elektr tarmoqlarida garmonik buzilişlarni kamaytiriş masalasi körib çiqiladi. Tadqiqotning maqsadi fazalar böyiça garmonik taşkil etuvçilarning taqsimlanişini baholaş hamda tokning garmonik buzilişlarini kamaytiriş uçun köp tarmoqli passiv filtrni qöllaş şartlarini aniqlaşdan iborat. Tadqiqot asosida örganilayotgan işda keltirilgan ölçov natijalaridan foydalanilgan bölib, ularga köra, tokning umumiy garmonik buziliş koeffitsiyenti A fazada 7,96 %, B fazada 14,72 % va C fazada 10,05 % ni taşkil etadi. Qiymatlar örtasidagi farq fazalarda garmonik buzilişlar darajasi bir xil emasligini körsatadi hamda elektr tarmoğining iş rejimlarini tabaqalaştirilgan holda baholaş zaruratini asoslaydi.

Kalit sözlar: elektr energiyasi sifati, tokning garmonik buzilişlari, yuqori garmonikalar, uç fazali elektr tarmoği, noçiziqli yuklama.

Abstract. This study addresses the problem of reducing harmonic distortion in three-phase electrical networks supplying nonlinear loads, including LED lighting devices and power electronic converters. The aim of the research is to evaluate the

distribution of harmonic components across phases and determine the conditions for applying a multi-branch passive filter to reduce current distortion. The study is based on measurement results presented in the investigated work, according to which the total harmonic distortion of current (THDi) is 7.96% in phase A, 14.72% in phase B, and 10.05% in phase C. The differences in these values indicate varying levels of harmonic distortion across the phases and justify the need for a differentiated assessment of network operating conditions.

Keywords: power quality, current harmonic distortion, higher harmonics, three-phase electrical network, nonlinear load.

Введение

Современные электрические сети характеризуются ростом электропотребления и расширением применения силовой электроники. Светодиодные осветительные устройства, регулируемые электроприводы, источники бесперебойного питания и электронные преобразователи относятся к нелинейным электроприёмникам, ток которых может отличаться от синусоидальной формы. Возникающие гармонические составляющие увеличивают потери, влияют на тепловой режим оборудования и могут вызывать искажения напряжения. При определённых параметрах сети и компенсирующих устройств возможно резонансное усиление отдельных гармоник.

Рост электропотребления, обусловленный промышленностью, электрификацией транспорта, системами охлаждения и центрами обработки данных, повышает значимость оценки качества электроэнергии с учётом характеристик подключённых электроприёмников [1].

Для Узбекистана вопросы качества электроэнергии актуальны на фоне расширения генерирующих мощностей и модернизации электросетевой инфраструктуры. По приведённым статистическим данным, в 2025 г. выработка электроэнергии в стране составила 86,7 млрд кВт·ч, а производство солнечных и ветровых электростанций достигло 10,5 млрд кВт·ч. Развитие энергетической инфраструктуры требует оценки режимов сети и согласования параметров подключаемого оборудования. При этом изменение структуры генерации само по себе не свидетельствует о росте гармонических искажений: их наличие и величина должны устанавливаться по результатам измерений в конкретных точках сети [2, 3].

Методическую основу оценки качества электроэнергии составляют международные стандарты IEEE Std 519-2022 и IEC 61000-4-30:2025. Первый устанавливает требования к гармоническим искажениям в электрических системах, в том числе в точке общего присоединения, второй определяет методы измерения и интерпретации показателей качества электроэнергии. Их применение позволяет обеспечить сопоставимость результатов измерений и оценок, выполненных после внедрения технических мероприятий [4, 5].

Для уменьшения гармонических искажений применяются пассивные фильтры на основе LC-цепей, настроенных на выбранные гармонические частоты. Их эффективность зависит от параметров индуктивности и ёмкости, характеристик питающей сети и спектра нагрузки. Ошибки настройки могут приводить к недостаточному подавлению гармоник или нежелательному резонансному взаимодействию с сетью. Поэтому выбор фильтрующих ветвей требует анализа фактического гармонического состава тока и проверки частотных характеристик системы «сеть - фильтр».

В рассматриваемых измерениях коэффициент искажения тока составил 7,96 % для фазы А, 14,72 % для фазы В и 10,05 % для фазы С. Наибольшее значение зарегистрировано в фазе В. Эти результаты указывают на различие показателей между фазами, однако без уточнения методики расчёта и спектров отдельных гармоник не позволяют установить причины различий или определить необходимые параметры фильтра.

Материалы и методы исследования

Исследование гармонических искажений в трёхфазной электрической сети основано на анализе гармонического состава тока по фазам А, В и С и определении параметров многоветвевого пассивного фильтра. Методика включает оценку суммарных гармонических искажений, определение относительных амплитуд отдельных гармоник, расчёт частот настройки фильтрующих ветвей и последующую проверку эффективности фильтрации.

Оценка гармонических искажений. Для количественной оценки гармонического состава тока используется коэффициент суммарных гармонических искажений тока:

$$THD_i = (\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \ldots + I_h^2)} / I_1) \times 100\ \%, \quad (1)$$

где THD_i - коэффициент суммарных гармонических искажений тока, %; I_1 - действующее значение первой гармоники тока, А; $I_2, I_3, \ldots, I_h$ - действующие значения гармонических составляющих тока, А; h - номер наибольшей учитываемой гармоники.

Для определения вклада отдельных гармоник применяется относительный коэффициент гармонической составляющей:

$$K_h = (I_h / I_1) \times 100\ \%, \quad (2)$$

где K_h - относительное значение h-й гармоники, %; I_h - действующее значение соответствующей гармоники, А; I_1 - действующее значение основной гармоники, А.

Использование выражений (1) и (2) позволяет оценить как общий уровень искажений, так и вклад отдельных гармоник в формирование несинусоидального тока. При этом расчёт выполняется отдельно для каждой фазы, поскольку различия в составе нагрузок могут приводить к неодинаковому распределению гармонических составляющих.

В исходных данных исследования приведены значения показателя

гармонических искажений для фаз A, B и C: 7,96 %, 14,72 % и 10,05 % соответственно. Наибольшее значение зарегистрировано в фазе B. Перед окончательным использованием этих результатов необходимо подтвердить, что указанные значения рассчитаны именно по формуле (1), а не представляют собой другой показатель гармонического состава.

Выбор частот настройки фильтрующих ветвей. Для подавления характерных гармоник рассматривается многоветвевой пассивный фильтр, содержащий отдельные LC-ветви. Резонансная частота последовательной LC-ветви определяется выражением:

$$f_h = 1 / (2\pi\sqrt{(L_h C_h)}), \quad (3)$$

где f_h - частота настройки фильтрующей ветви, Гц; L_h - индуктивность, Гн; C_h - ёмкость, Ф.

Связь частоты настройки с номером гармоники определяется выражением:

$$f_h = h \times f_1, \quad (4)$$

где h - номер гармоники; f_1 - основная частота сети, Гц.

При основной частоте сети $f_1 = 50$ Гц расчётные частоты третьей, пятой, седьмой и девятой гармоник составляют соответственно 150, 250, 350 и 450 Гц. Эти значения могут использоваться как исходные частоты настройки соответствующих фильтрующих ветвей. Окончательный выбор параметров должен учитывать фактический спектр тока и частотные характеристики питающей сети.

Из выражения (3) ёмкость фильтрующей ветви определяется по заданным значениям индуктивности и частоты настройки:

$$C_h = 1 / ((2\pi f_h)^2 \times L_h). \quad (5)$$

где C_h - требуемая ёмкость, Ф; f_h - выбранная частота настройки, Гц; L_h - заданная индуктивность, Гн.

Формула (5) устанавливает расчётную зависимость между параметрами LC-ветви, но сама по себе не гарантирует снижения всех гармонических составляющих. Для обоснованного выбора параметров необходимо также учитывать сопротивление сети на соответствующих частотах и возможность возникновения резонансного усиления.

Оценка эффективности фильтрации. Эффективность пассивного фильтра предлагается оценивать сравнением показателей гармонических искажений до и после его подключения:

$$\eta_{th}d = ((THD_{i,до} - THD_{i,после}) / THD_{i,до}) \times 100\ \%, \quad (6)$$

где $\eta_{th}d$ - относительное снижение суммарных гармонических искажений, %; $THD_{i,до}$ - коэффициент суммарных гармонических искажений до фильтрации, %; $THD_{i,после}$ - коэффициент суммарных гармонических искажений после фильтрации, %.

Расчёт выполняется отдельно для каждой фазы. Это позволяет определить не только общее изменение гармонических искажений, но и различия в результатах

фильтрации между фазами.

Количественная оценка эффективности возможна после определения параметров LC-ветвей и получения расчётных либо экспериментальных результатов.

Анализ результатов и обоснование выбора фильтрующего устройства

Анализ измеренных показателей гармонических искажений. Результаты исследования качества электрической энергии в трёхфазной сети представлены в таблице 1. Измеренные значения четырёх показателей - КУ, KUmax, КИ и КМмакс - характеризуют различия между фазами A, B и C.

Таблица 1

Результаты измерений показателей по фазам электрической сети

Показатель	Фаза A, %	Фаза B, %	Фаза C, %
КУ	1,99	1,81	1,79
KUmax	2,51	2,21	2,33
КИ	7,96	14,72	10,05
КМмакс	13,09	24,89	15,04

Наибольшие значения показателей КИ и КМмакс зарегистрированы в фазе B и составляют 14,72 и 24,89% соответственно. Значение КИ в фазе B превышает показатель фазы A на 6,76 процентного пункта, а фазы C - на 4,67 процентного пункта. Для КМмакс превышение составляет 11,80 процентного пункта относительно фазы A и 9,85 процентного пункта относительно фазы C.

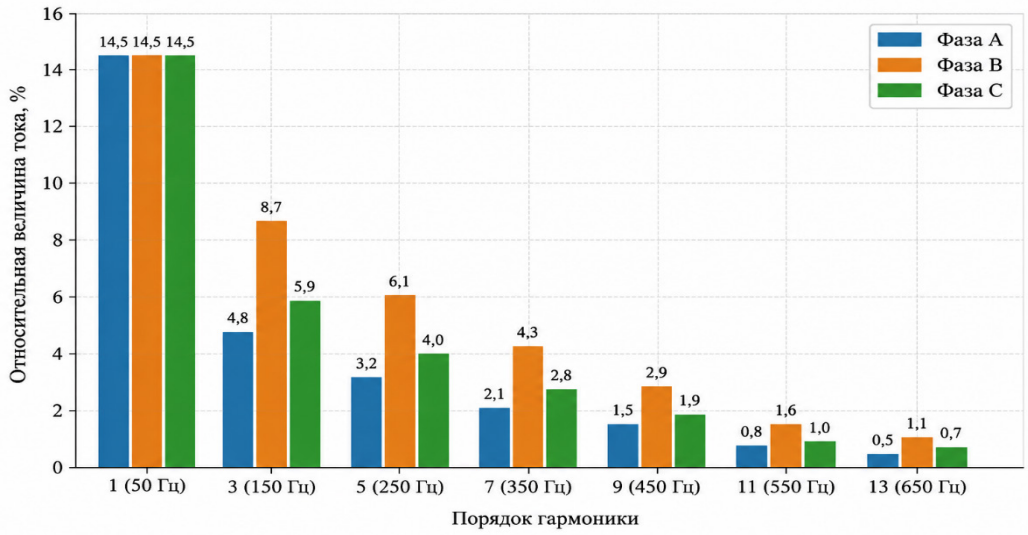


Рисунок 1 — Спектр гармонических составляющих тока по фазам A, B и C

Рис.1. Сравнение значений показателя КИ по фазам A, B и C

Различия между фазами обосновывают необходимость их раздельного анализа. Причины искажений следует устанавливать с учётом состава нагрузки, режима оборудования и спектральных характеристик тока и напряжения [5, 6].

В исходной работе также отмечено, что коэффициент искажения синусоидальной формы тока достигает 25%. Данный результат указывает на значительный уровень искажений в рассматриваемом режиме. Однако значение 25% необходимо рассматривать отдельно от показателей таблицы 1 до подтверждения их определений, методик расчёта и условий измерения. Показатели КИ и КМмакс нельзя автоматически отождествлять с суммарным коэффициентом гармонических искажений THD.

Для выбора частот настройки необходимо определить действующие значения основной и высших гармонических составляющих тока и напряжения [4, 6].

Анализ гармонических составляющих и выбор частот фильтрации. В исходном исследовании отдельно рассматривается третья гармоника тока, уровень которой характеризуется как значительный. Для определения её вклада в искажение формы тока необходимо сопоставить действующее значение третьей гармоники с действующим значением основной составляющей. Аналогичный подход применяется к другим гармоникам, присутствующим в спектре исследуемого сигнала. Спектральный анализ позволяет определить уровни отдельных гармоник и сформировать исходные данные для выбора средств компенсации [6, 7].

Частота гармонической составляющей определяется выражением:

$$f_h = h \cdot f_1, \quad (8)$$

где f_h - частота гармоники, Гц; h - порядок гармоники; f_1 - частота основной составляющей, Гц.

Четыре настроенные ветви позволяют воздействовать на выбранные частотные составляющие. Их выбор должен подтверждаться спектральным анализом, а эффективность зависит от спектра тока, параметров элементов, сопротивления сети и режима нагрузки [6, 7].

Особого внимания требует третья гармоника. Если исследуемая система имеет нейтральный проводник, необходимо оценить ток в нём, поскольку гармоники, кратные третьей, при определённых условиях могут суммироваться в нейтральном проводнике. Это важно для оценки тепловой нагрузки проводников и проверки допустимости выбранного режима эксплуатации.

Расчёт параметров пассивного LC-фильтра. Для настройки пассивных фильтрующих ветвей используются индуктивные и ёмкостные элементы. Для идеализированной последовательной LC-цепи частота резонанса определяется зависимостью:

$$f_h = 1 / (2\pi\sqrt{(L_h C_h)}), \quad (9)$$

где L_h - индуктивность ветви, Гн; C_h - ёмкость конденсатора, Ф; f_h - частота настройки, Гц.

При заданной индуктивности требуемая ёмкость определяется выражением:

$$C_h = 1 / ((2\pi f_h)^2 L_h). \quad (10)$$

Параметры ветвей рассчитываются отдельно для частот 150, 250, 350 и 450 Гц. При выборе элементов учитываются допустимые токи и напряжения, реактивная мощность конденсаторов, потери и условия подключения к сети [6, 7].

Численные значения индуктивностей и ёмкостей в доступных исходных материалах не приведены. В связи с этим таблицу расчётных параметров ветвей следует формировать после задания исходных проектных величин. Приведение неподтверждённых номиналов не позволило бы воспроизвести расчёт и проверить полученные результаты.

Частотный анализ системы «сеть - фильтр». При подключении пассивного фильтра необходимо исследовать частотное взаимодействие его ветвей с электрической сетью. Изменение эквивалентного сопротивления сети, параметров индуктивностей и ёмкостей может приводить к возникновению резонансных режимов, при которых отдельные гармонические составляющие не ослабляются, а усиливаются. Риск резонансного усиления является одним из факторов, учитываемых при проектировании и проверке гармонических фильтров [6, 7].

Проверка должна охватывать частотную характеристику системы «сеть – фильтр», влияние параметров элементов и отсутствие нежелательного усиления гармоник.

Частота настройки отдельной LC-ветви не обязательно совпадает с резонансными частотами всей системы, определяемыми совместным действием фильтра, сети и нагрузки. Поэтому анализ частотных характеристик обязателен [6, 7].

Количественная оценка эффективности фильтрации

Для оценки искажений напряжения используется показатель $THD_v = (\sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + \ldots + V_h^2)} / V_1) \cdot 100\ \%$, где V_1 — действующее значение основной составляющей, а V_h — гармоники напряжения.

Эффективность фильтрации определяют по снижению THD_i и THD_v до и после подключения устройства при одинаковых условиях измерения или моделирования. Поскольку результаты после фильтрации отсутствуют, численная эффективность в настоящем исследовании не устанавливается.

Заключение

В статье рассмотрены особенности гармонических искажений тока и напряжения в электрических сетях, а также возможность применения пассивных LC-фильтров для снижения влияния отдельных гармонических составляющих. По имеющимся данным проанализированы показатели трёх фаз. Наибольшее значение показателя КИ зафиксировано в фазе В и составило 14,72 %, тогда как в фазах А и С значения составили 7,96 % и 10,05 % соответственно. Полученные данные указывают на различия между фазами и необходимость дальнейшего анализа гармонического состава электрической сети.

В качестве возможного технического решения рассмотрено применение фильтрующих ветвей, предназначенных для компенсации третьей, пятой, седьмой и девятой гармоник. При основной частоте сети 50 Гц соответствующие частоты составляют 150, 250, 350 и 450 Гц. Выбор конкретных параметров LC-фильтров требует дополнительных расчётов с учётом характеристик сети и режимов подключённой нагрузки.

Для иллюстрации предлагаемого технического решения на рисунке 2 представлена структурная схема пассивного фильтра, содержащего несколько LC-ветвей, настроенных на выбранные гармонические частоты.

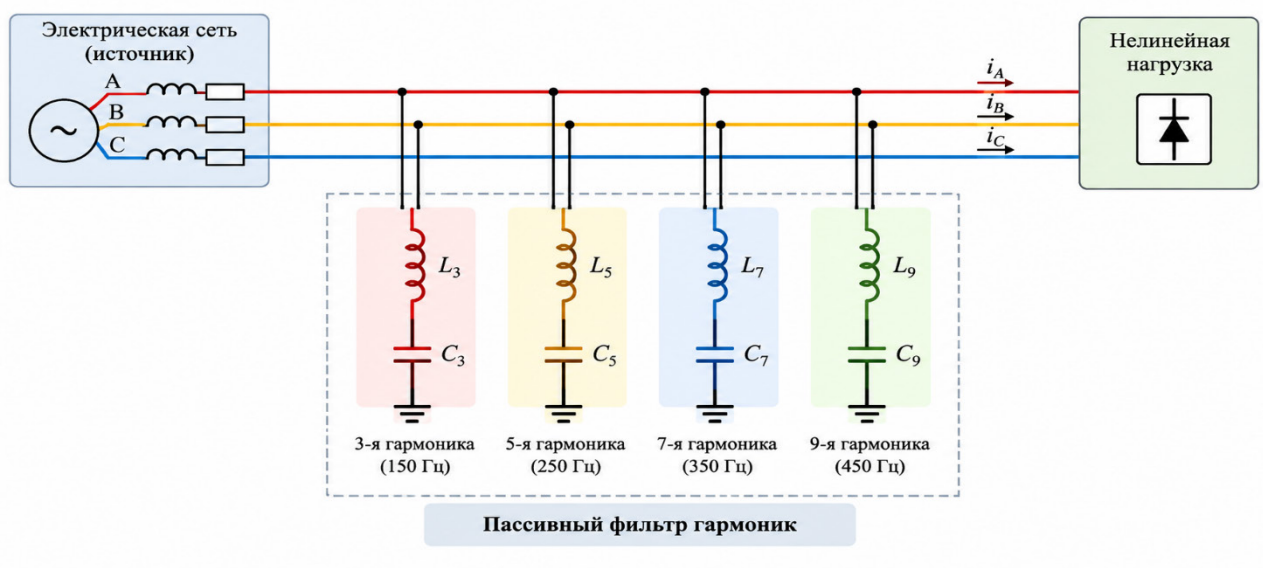


Рис.2.Структурная схема пассивного фильтра для компенсации 3-й, 5-й, 7-й и 9-й гармоник

Каждая LC-ветвь создаёт путь с пониженным импедансом вблизи заданной частоты. Параметры элементов определяются расчётом с учётом характеристик сети и нагрузки; эффективность схемы требует подтверждения моделированием или экспериментом. Практическая значимость подхода состоит в последовательном анализе гармоник и выборе частот фильтрации. Количественная эффективность в настоящем исследовании не определялась из-за отсутствия данных до и после подключения фильтра.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на уточнение параметров гармонического состава, расчёт элементов LC-фильтров и моделирование их работы при различных режимах нагрузки. Перспективным направлением также является применение интеллектуальных систем мониторинга для контроля качества электроэнергии и повышения энергоэффективности инфокоммуникационных объектов. Эти задачи согласуются с рассмотренными в предыдущих работах автора вопросами мониторинга электроснабжения, развития интеллектуальных энергосетей и оптимизации энергоэффективности [8-10].

Список литературы

1. IEEE. IEEE Std 519-2022: IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE, 2022.
2. International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-30:2025. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods. 4th ed. Geneva: IEC, 2025.
3. International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-7:2002+AMD1:2008 CSV. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation. Geneva: IEC, 2008.
4. Ali M., Al-Ismail F.S., Gulzar M.M., Khalid M. A review on harmonic elimination and mitigation techniques in power converter based systems. Electric Power Systems Research, 2024.
5. Reguieg Z., Bouyakoub I., Mehedi F. Harmonic mitigation in grid-integrated renewable energy systems with nonlinear loads. Energy, 2025.
6. Herrera Campo C.A., Garrido V., Caicedo Peñaranda E.A., Guarin J.G. Harmonic Distortion Analysis and Mitigation in LED Public Lighting Systems Using PID Control and LC Filters. 2025 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), 2025.
7. Implementation and performance comparison of harmonic mitigation schemes for three-phase grid-connected voltage-source converter under grid voltage distortion: HiL and experimental validation. Electrical Engineering, 2023.
8. Amurova N.Y. Innovative systems for control and monitoring of electric supply: Global trends and advanced scientific developments to improve the quality of electricity at infocommunications enterprises. AIP Conference Proceedings, 2025.
9. Амурова Н. Ю. Интеллектуальные энергосети в Узбекистане: концепции, технологии и перспективы развития. Yangi Özbekiston taraqqiyotida tadqiqotlarning örni va rivojlaniş omillari, 2025.
10. Амурова Н. Ю. Использование интеллектуальных систем и децентрализованных энергоресурсов для оптимизации энергоэффективности. Yangi Özbekiston taraqqiyotida tadqiqotlarning örni va rivojlaniş omillari, 2025.