

УДК 621.316

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
АКТИВНОГО ФИЛЬТРА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СТОИМОСТИ**

Леонова Ю.Ю., аспирант гр. ЭТа-231, III курс,
Негадаев В.А., к.т.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Требования к качеству электроэнергии, в том числе предельно допустимые значения коэффициентов гармонических составляющих напряжений, установлены ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». За несоответствие показателей качества электроэнергии предусмотрены надбавки к тарифу за электроэнергию. В зависимости от степени отклонения надбавки могут составлять до 10 % тарифа на электроэнергию.

С увеличением числа потребителей электрической энергии, обладающих нелинейными вольт-амперными характеристиками (импульсных преобразователей), качество электрической энергии ухудшается за счёт появления в кривой напряжения или тока гармоник $U_{(n)}$ или $I_{(n)}$ высших частот, кратных основной частоте ($n = 2, 3, 4, \dots, \infty$), то есть за счёт появления несинусоидальности [1].

Высшие гармоники нарушают работу электрических машин, систем автоматики и релейной защиты, электроники; вызывают перегрузку и повреждение конденсаторов, за счёт чего снижается эффективность работы устройств компенсации реактивной мощности на основе статических конденсаторов. Воздействие тока третьей гармоники (и гармоник, кратных трём) приводит к появлению нулевой последовательности. Суммарный ток всех гармоник в нулевом проводе может превышать фазные значения в полтора-два раза [1].

Для компенсации высших гармоник тока и напряжения используются пассивные, активные и гибридные фильтры различных конфигураций.

Несмотря на доступность, простоту конструкции и лёгкость в эксплуатации, пассивные фильтры, состоящие из набора ёмкостных и индуктивных компонентов, имеют ограничения в применении, так как они не могут подстраиваться к изменениям гармонического состава частот (параметры ёмкостных и индуктивных компонентов фильтра подбираются для компенсации конкретных гармонических составляющих) [2].

Активные фильтры гармоник могут подстраиваться к изменениям спектра гармонических составляющих и подавляют гармоники любого по-

рядка. Но такие фильтры отличаются высокой стоимостью, при этом, чем большее значение реактивной мощности должен компенсировать фильтр, тем дороже конструкция. Сложность в установке и эксплуатации, высокие требования к системам измерений и управлению также ограничивают применение данного вида фильтров. Кроме того, активные фильтры имеют ограничения в сетях с уже установленными конденсаторными установками коррекции коэффициента мощности из-за наличия резонансных явлений [2]. Топология фильтров и большое количество вариантов для реализации в части алгоритмов управления усложняют выбор параметров активного фильтра и являются предметом многих исследований. За последние годы вышло несколько тематических обзорных работ, посвященных параллельным активным фильтрам [3], оптимизации адаптивных параллельных фильтров [4], алгоритмам управления активным фильтром [5].

В работах исследуются конфигурации силовых цепей активных фильтров как на основе традиционных транзисторов с изолированным затвором, так и активных фильтров с транзисторами с изолированным затвором, выполненными на основе карбида кремния SiC и нитрида галлия GaN [3], методы генерации задающего тока [5, 6], методы управления током [6, 7].

Гибридные фильтры, представляющие собой устройства, содержащие активные и пассивные ветви, дешевле активных. За счёт того, что пассивные фильтры компенсируют основные гармоники и компенсируют реактивную мощность (при необходимости), активные модули корректируют оставшиеся искажения и гармоники, изменяющиеся в динамике, что позволяет снизить номинальные параметры активных фильтров.

При выборе устройств компенсации высших гармоник и их параметров критериями оптимальности являются стоимость потерь электроэнергии, стоимость фильтра, процент снижения высших гармоник, коэффициенты гармоник тока и напряжения в сети до и после компенсации, эксплуатационная надёжность, техническая реализуемость и т.д. Некоторые исследователи предлагают дополнительно применять специфические критерии, например, коэффициент полной мощности, коэффициент реактивной мощности, коэффициент мощности искажения. Критерии могут быть как единичными, так и применяться совместно с другими [8, 9].

Однако стоит отметить, что зачастую выбор параметров идёт для конкретного типа фильтров, но при этом тип фильтра (активный или пассивный) не выбирается; характер зависимости стоимости компенсации реактивной мощности, вызванной наличием высших гармоник, не учитывается. Это может привести к решениям, которые не будут удовлетворять критерию оптимальности с точки зрения минимума стоимости компенсации.

Поэтому для обоснования целесообразности применения разных типов фильтров (активных или пассивных) авторами проведена работа по определению зависимостей между стоимостью устройств компенсации реактивной мощности, вызванной наличием высших гармоник, и их параметрами.

В качестве исходной информации использованы данные о параметрах активных фильтров группы компаний «Эталон» (Россия), конденсаторов и реакторов, входящих в пассивные фильтры, для напряжения 0,4 кВ трёхфазной сети частоты 50 Гц.

На основании информации о параметрах и стоимости фильтрокомпенсирующих устройств построены графики зависимости стоимости фильтров (пассивного и активного) от тока (рис. 1).

Из анализа зависимостей на рис. 1, пересечение графиков зависимостей для активного и пассивного фильтров не прогнозируется.

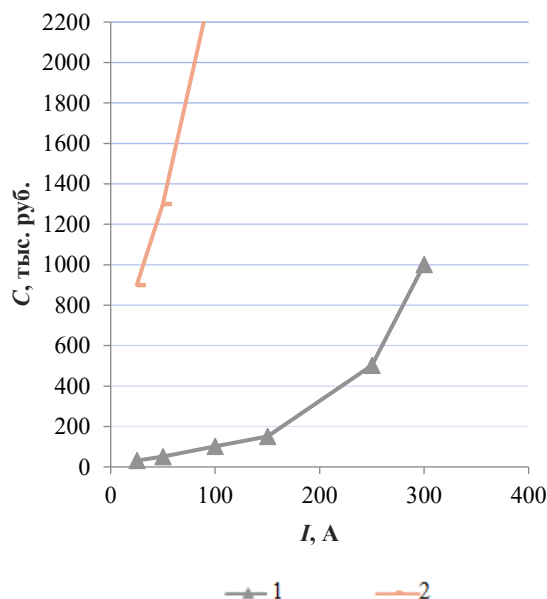


Рис. 1. Зависимость стоимости фильтров C от допустимого тока I :
1 — пассивный фильтр с параметрами, 20 мкФ 23/мГн; 2 — активный фильтр

Так как в электрической сети зачастую стоит задача одновременного увеличения коэффициента мощности по основной гармонике, подобраны параметры пассивных фильтров для случаев, когда дополнительно к подавлению высших гармоник требуется компенсация реактивной мощности. Построены графики зависимости стоимости пассивного фильтра от реактивной мощности при фильтрации одиночных гармоник и группы гармоник (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что стоимость фильтрокомпенсирующих устройств практически линейно зависит от реактивной мощности. При этом увеличение числа компенсируемых гармоник (рис 2, б) не приводит к кратному увеличению стоимости фильтрокомпенсирующего устройства, так как реактивная мощность распределяется между всеми ветвями фильтра с учётом амплитуды тока на ветвях и составляет практически такое же значение, что и для фильтра с подавлением одной гармоники.

Учитывая, что стоимость активного фильтра при прочих равных условиях выше в разы (особенно при малых токах (рис. 1)), при этом стоимость фильтрации гармоник, в основном, зависит от тока, которые эти гармоники создают, и не зависит от количества и номера фильтруемых гармоник, а сто-

имость пассивных фильтров напрямую определяется количеством фильтруемых гармоник и их номером (рис. 2), определено то количество гармоник, подлежащих фильтрации, при котором стоимость пассивного фильтра приближается к стоимости активного фильтра (рис. 3).

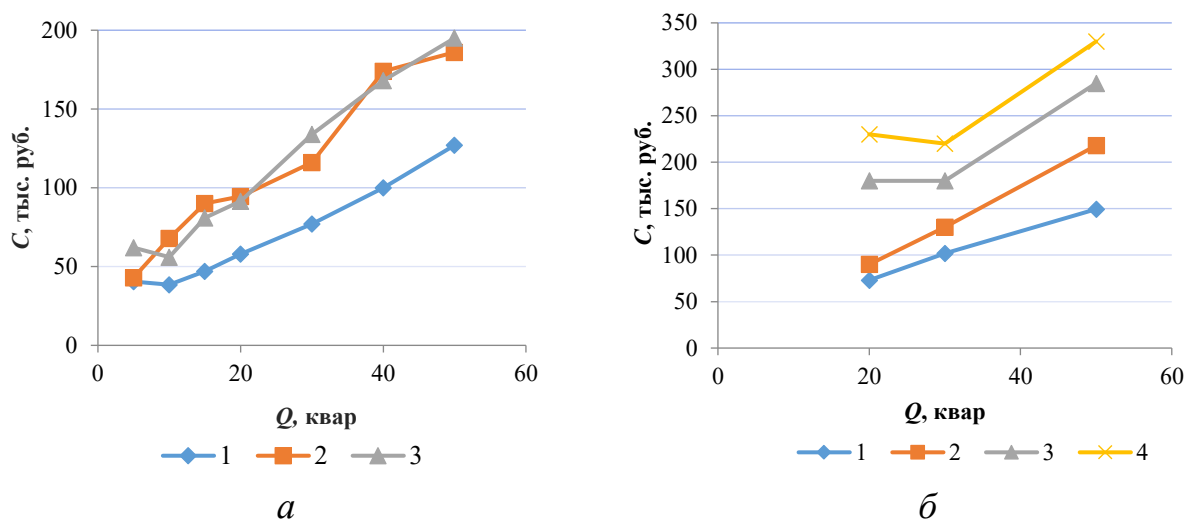


Рис. 2. Зависимость стоимости пассивного фильтра C от реактивной мощности Q при фильтрации гармоники а: 1 – 3-я; 2 – 5-я; 3 – 7-я; б: 1 – 3-я и 5-я; 2 – 3-я, 5-я и 7-я; 3 – 3-я, 5-я, 7-я и 11-я; 4 – 3-я, 5-я, 7-я, 11-я и 13-я

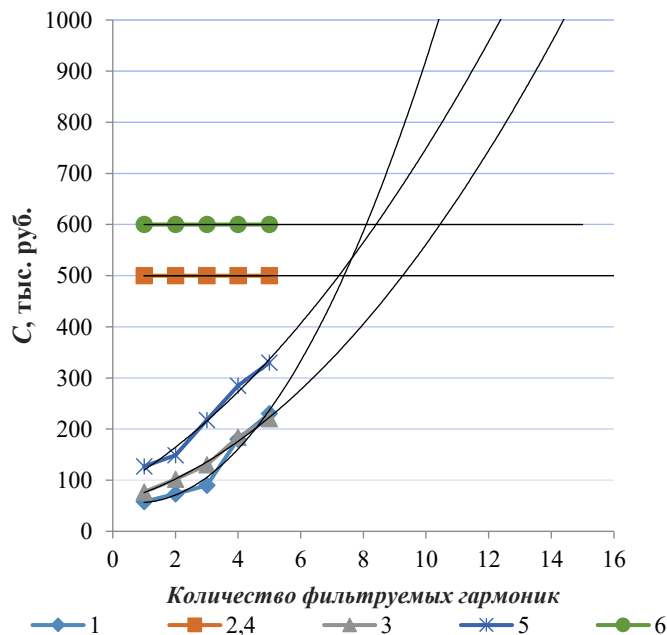


Рис. 3. Зависимость стоимости фильтра C от количества фильтруемых гармоник: 1, 3, 5 – пассивные фильтры с компенсацией реактивной мощности 20, 30, 50 квар соответственно; 2, 4, 6 – активные фильтры с компенсацией реактивной мощности 20, 30, 50 квар соответственно

На рис. 3 приведены графики зависимости стоимости пассивного и активного фильтра от количества фильтруемых гармоник для случаев компенсации реактивной мощности в 20, 30 и 50 квар. Из графиков видно, что стоимость активного фильтра постоянна при изменении количества фильтруемых гармоник, если реактивная мощность постоянна. Стоимость пассивного фильтра, рассчитанного на компенсацию 20 квар, приближается к стоимости активного фильтра при необходимости компенсации 7 гармоник. Стоимости активного фильтра, рассчитанного на компенсацию 30 квар, соответствует стоимость пассивного фильтра, рассчитанного на компенсацию порядка 9 гармоник при той же реактивной мощности. При 50 квар значение количества фильтруемых пассивным фильтром гармоник достигает 8.

Таким образом, исходя из результатов исследования, сделан вывод, что активные фильтры целесообразно рассматривать в качестве фильтрокомпенсирующих устройств в случае, если необходимо компенсировать более 7 гармоник, коэффициент искажения которых (в том числе суммарный) не соответствует требованиям нормативной документации.

Список литературы:

1. Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П., Ян А.В., Слюсарев А.С. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 6. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.
2. Сычев Ю.А. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами / Ю.А. Сычев, Р.Ю. Зимин // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 132-140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.
3. Popescu M., Bitoleanu A., Suru C.V., Linca M.; Alboteanu L. Shunt Active Power Filters in Three-Phase, Three-Wire Systems: A Topical Review // Energies. 2024. № 17, 2867. P. 1-42. <https://doi.org/10.3390/en17122867>.
4. Duc M.L.; Hlavaty L.; Bilik P.; Martinek R. Harmonic Mitigation Using Meta-Heuristic Optimization for Shunt Adaptive Power Filters: A Review // Energies. 2023. № 16, 3998. P. 1-55. <https://doi.org/10.3390/en16103998>.
5. Hoon Y., Mohd Radzi M.A., Hassan M.K., Mailah N.F. Control Algorithms of Shunt Active Power Filter for Harmonics Mitigation: A Review // Energies. 2017. Vol. 10. P. 2038. <https://doi.org/10.3390/en10122038>.
6. Das S.R., Ray P.K., Sahoo A.K., Ramasub-bareddy S., Babu T.S., Kumar N.M., Elavarasan R.M., Mihet-Popa L. A comprehensive survey on different control strategies and applications of active power filters for power quality improvement // Energies. 2021. Vol. 14. P. 4589.
7. Tareen W.U.K., Aamir M., Mekhilef S., Nakaoka M., Seyedmahmoudian M., Horan B., Memon M.A., Baig N.A. Mitigation of power quality issues due to high penetration of renewable energy sources in electric grid systems using three-

phase APF/STATCOM Technologies: A Review // *Energies*. 2018. № 11 (6). 1491. P. 1-42. <https://doi.org/10.3390/en11061491>.

8. Шипулина У.Н., Мухаметгалеев Т.Х., Сидоров С.С., Мухаметов Г.М. Модель частотно-регулируемого электропривода в программном пакете Matlab // *Вестник технологического университета*. 2021. Т. 24. №5. С. 78-81.

9. Zhilin E.V., Prasol D.A., Savvin N.Y. Optimization of the structure of filter-compensating devices in networks with powerful non-linear power consumers based on fuzzy logic // *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. December 2022. Vol. 12, №. 6. P. 5730-5737. ISSN: 2088-8708. DOI: 10.11591/ijece.v12i6.pp5730-5737.