

Нелинейные искажения входного тока активного корректора коэффициента мощности на основе Виенна-выпрямителя

И. Ю. Абдулхаков¹, Ю. Ю. Перевалов², М. Н. Кудряш³,
М. Р. Ермакова⁴, В. Е. Пармёнов⁵, А. С. Мельников⁶

Санкт Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹abdulhakov.iljas@yandex.ru, ²yyperevalov@yandex.ru, ³knn27@yandex.ru,
⁴myermekova@gmail.com, ⁵parmenov.slava@yandex.ru, ⁶asmelnikov.spb@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы нелинейных искажений входного тока активного выпрямителя на основе Виенна-выпрямителя с разными принципами управления. Также приводятся количественные характеристики нелинейных искажений входного тока на величину тока нулевого провода (суммы токов).

Ключевые слова: электроэнергетика; компенсация реактивной мощности; активный выпрямитель; Виенна-выпрямитель; коэффициент нелинейных искажений

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день все более важную роль приобретает проблема энергосбережения. Принимаются федеральные законы [1]. По официальным данным в России на 2021 год относительно общей отпускаемой энергии в сеть составляет порядка 10 % [2], то есть потенциал электросбережения до сих пор остается на значительном уровне. Поэтому проведение мероприятий по электросбережению позволят не только получить значительную экономию энергетических ресурсов за счет сокращения количества непроизводительной энергии, но и повысить энергетическую пропускную способность и надежность существующих мощностей электроснабжения.

В процессе доставки полезной электроэнергии до потребителя естественным образом часть этой энергии рассеивается (затрачивается на доставку). Несмотря на проводимые мероприятия по повышению энергоэффективности процесса доставки (повышение пропускной способности линий электропередач, трансформаторных подстанций и иных систем доставки электроэнергии и т.п.) из-за деятельности потребителя, его воздействия на сеть – данные мероприятия не столь эффективны, как могли бы быть. В частности, реактивная мощность, генерируемая потребителем и циркулирующая в электросети, а также эмитируемые потребителем электромагнитные помехи вызывают значительные потери в системе доставки электроэнергии. Поэтому, в особенности, крупные потребители используют устройства компенсации реактивной мощности, высокую популярность среди которых на сегодняшний день набирают активные корректоры коэффициента мощности (активные выпрямители). Несмотря на высокий входной коэффициент мощности таких активных выпрямителей - из-за нелинейных искажений (total harmonic distortion

далее THD) их входных токов, сумма которых, зачастую, оказывается значительно отличающийся от нуля. Что в свою очередь так же нагружает, как фазные, так и нейтральный проводник, существенно снижая выгоду от проведенных мероприятий. Поэтому в данной работе, в том числе, рассматривается зависимость THD входного тока активного выпрямителя и тока нейтрального провода Виенна-выпрямителя.

II. ВЛИЯНИЕ ЦИРКУЛИРУЮЩЕЙ В СЕТИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Передача электроэнергии от генератора электростанции по электрической сети до потребителя сопровождается затратами активной полезной мощности в элементах сети [3]. Реактивная же мощность, вызванная потребителями и / или реактивными и активно-реактивными элементами сети, циркулирует по электросетям от потребителя до генератора и обратно, вызывая дополнительные потери в электроснабжающих потребителя элементах. Таким образом, реактивная мощность, циркулирующая в сети, является нежелательной и ее уровень должен быть ограничен на минимально возможном уровне.

Упрощенно потери в линии электропередач можно представить, как:

$$\Delta P = I^2 \cdot R, \quad (1)$$

где I – ток сети, R – активное сопротивление сети.

Нетрудно преобразовать выражение (1), учитывая, что ток сети $I = S/U$, где S – полная мощность сети, а U – напряжение сети. В свою очередь полную мощность можно представить, как: $S = P/\cos(\varphi)$. Допуская, что $\cos(\varphi)$ цепей генератора и потребителя равны. Так же вводя допущение, что с изменением в пределах близких к 1 $\cos(\varphi)$ падение напряжения на активной составляющей сопротивления элементов питающей сети ΔU существенно не изменяется – тогда выражение 1 можно переписать к виду:

$$\Delta P = \frac{P_{акт}^2 \cdot R}{\Delta U^2 \cdot \cos^2(\varphi)},$$

где $P_{акт}$ – активная мощность, передаваемая через сеть. Таким образом, видно, что потери в сети обратно пропорциональны квадрату $\cos(\varphi)$.

На рис. 1 приводится зависимость процентного снижения потерь электроэнергии на передачу от $\cos(\varphi)$ мощности передаваемой линией электропередач. Если

Работа выполнена в рамках НИОКР НП/ТОПР-15 "Разработка цифровых интеллектуальных комплексов электромагнитной обработки материалов" СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

принять $\cos(\phi)$ равным 0,85, тогда увеличение $\cos(\phi)$ на 0,01, то есть, доведя его до 0,86, позволит снизить потери в линии электропередач на 2,5 %, что является значительной величиной, экономически привлекательно и целесообразно.

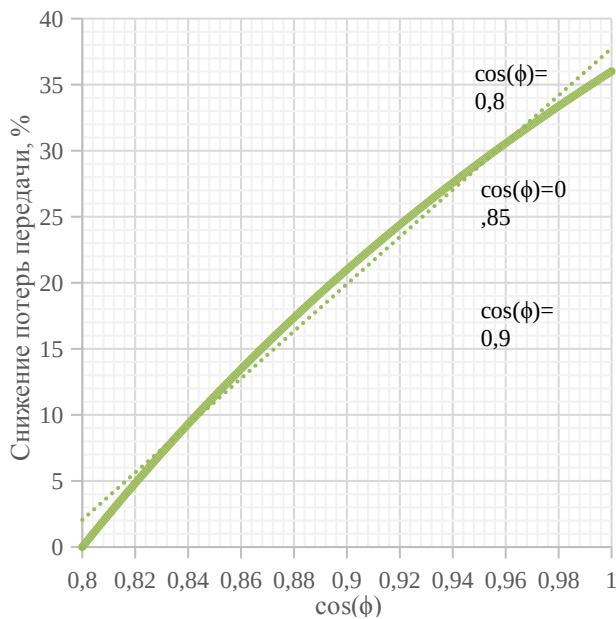


Рис. 1. Зависимость снижения потерь электроэнергии от $\cos(\phi)$

III. ГАРМОНИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ ТОКА СЕТИ

В предыдущей главе был затронут вопрос потерь электроэнергии в электросети в зависимости от циркулирующей в ней мощности. Однако высшие гармоники, объективно которые могут достигать значительных значений так же, как и циркулирующая реактивная мощность оказывают значительные потери мощности, величина которых, на сегодняшний день в необходимой мере не рассмотрена. На сегодня нет обобщенной информации, поясняющей величины и влияния гармонических искажений тока сети на потери в системе передачи электроэнергии, и это в принципе кажется практически невыполнимой задачей. Обобщить и выдать интегральные характеристики по высшим гармоникам тока, циркулирующим в сети невозможно по целому ряду причин. Гармонический состав всегда непостоянен и будет изменяться от измерения к измерению, в зависимости от того, какой потребитель в данный момент времени включен в сеть, например, в рабочее время, когда работают крупные промышленные потребители, гармонические искажения имеют максимальные значения.

Линию электропередач в статическом режиме упрощённо можно представить, как длинную линию с сосредоточенными параметрами, схема которой представлена на рис. 2. На рис. 2 L_1 и C_1 представляют из себя индуктивность и емкость линии соответственно; R_1 – активная составляющая сопротивления линии; U_{in} – входное напряжение линии; I_{freq} – частотные составляющие тока, генерируемого нагрузкой. Схема замещения на рис. 2 сильно упрощена и не отображает иных реактивных элементов, например, для преобразования напряжения.

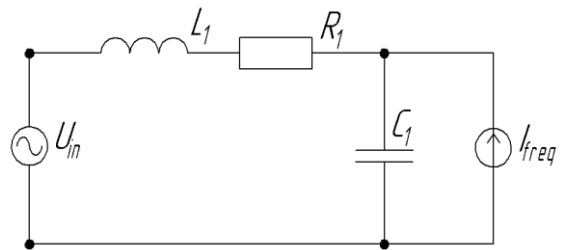


Рис. 2. Схема замещения линии электропередач с сосредоточенными параметрами

Потери ΔP от гармонических токов I_{freqn} можно представить, как:

$$\Delta P = \sum_{n=2}^{\infty} I_{freqn}^2 \cdot R_n,$$

где R_n – активная составляющая сопротивления линии на n -й гармонике. При этом, как известно, сопротивление проводника, также зависит от глубины проникновения тока в проводник. Глубина, в свою очередь, зависит от частоты и свойств материала. Изменение сопротивления вследствие эффекта близости и других внешних воздействий, кроме глубины проникновения, в данной работе не рассматриваются:

$$R = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление проводника, μ – магнитная проницаемость проводника или проводящего тела; f – частота тока. Таким образом, видно, что с ростом частоты активная составляющая сопротивления увеличивается. Индуктивность и емкость линии, ввиду того, что электромагнитные поля в основном сосредоточены в воздушной среде – поэтому от частоты зависят слабо, кроме, естественно, их реактивных сопротивлений. Трансформаторы, задействованные в электроснабжении, подвергаются, возможно, еще большему пагубному влиянию этих самых гармонических искажений, ввиду того, что увеличиваются индуцируемые токи в их стальных сердечниках, растут потери в обмотках, а также увеличиваются потери на перемагничивание стального сердечника. Все это может приводить не только к увеличению потерь в силовых трансформаторах, но и выходу их из строя. Соответственно можно косвенно говорить о снижении, как их потенциального срока службы, так и их надежности, соответственно надежности электроснабжения в целом.

На рис. 3 приводится спектральный состав напряжения в сети электропитания одного из крупных промышленных потребителей г. Санкт-Петербург. Нельзя говорить о том, что спектральный состав в сети данного потребителя такой всегда, даже в момент проведения измерения амплитуды некоторых гармоник показания отличались в несколько десятков раз, но они были приведены в некоторый стационарный момент, когда спектр практически не изменялся. Спектральный состав приводится до частоты равной 1 кГц. Из рис. 3 видно, что 3-я гармоника напряжения находится, по сравнению с основной, на уровне, приблизительно, – 25 дБВ, соответственно 3-я гармоника напряжения в 18 раз меньше, чем несущая в 50 Гц. Трудно представить величины циркулирующих в сети токов, способных

оставить на сопротивлении сети столь значительную реакцию. Стоит отметить, что искажения синуса сети на

экране осциллографа были заметны невооруженным взглядом.

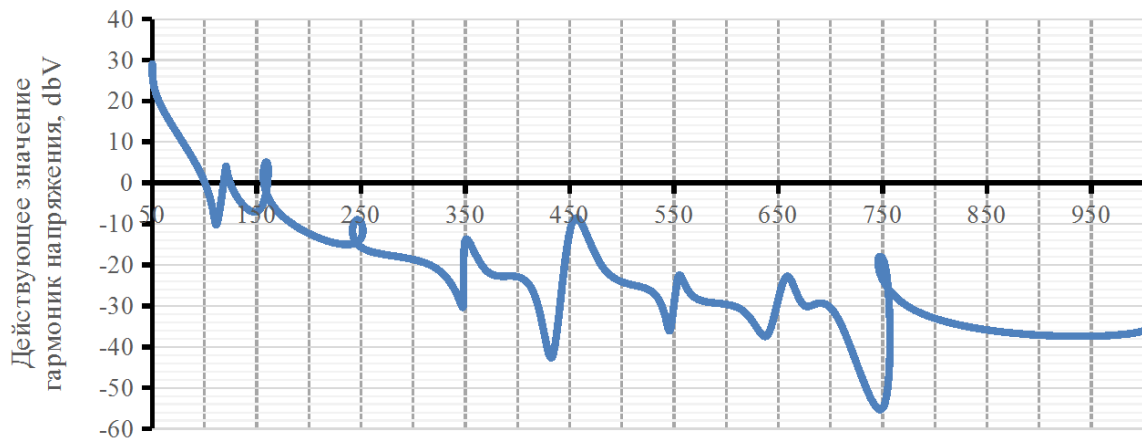


Рис. 3. Схема замещения линии электропередач с сосредоточенными параметрами

IV. ОПИСАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ АКТИВНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ВЬЕННА-ВЫПРЯМИТЕЛЯ

В пакете LtSpice была разработана компьютерная модель Вьенна-выпрямителя, структурная схема которого изображена на рис. 4. Структурная схема отображает состав и принцип работы модели. Модель примечательна тем, что используются свойства реальных полупроводниковых элементов (транзисторы, диоды, операционные усилители и т.д.). Модель состоит из следующих основных узлов: входного НЧ фильтра на основе элементов L1-L7, C1-C9; трехфазного выпрямителя на основе диодов D1-D6; индивидуальных фазных системах управления A1-A3, построенных на основе ПИД регулятора, который в свою очередь осуществляет управление ШИМ контроллером A1; силовых транзисторов S1-S3; выходного фильтра на C10, C11; активной нагрузки R1.

Значения реактивных элементов фильтров выбраны исходя из габаритных и экономических характеристик устройства мощностью до 40 кВт с учетом их конечной добротности. Сопрягающие частоты регулятора подбирались по значениям таковыми, чтобы регулятор не входил в режим самовозбуждения на частотах близким к резонансным частотам фильтров, а перерегулирование при этом оставалось на минимальных значениях.

В рамках данной работы также была построена модель Вьенна-выпрямителя с адаптивным управлением, как будет показано далее, позволяющая достичь лучших режимов работы с точки зрения качеств входных токов. Работа и принцип построения модели достаточно подробно разобрана в трудах [4]. В рамках данной работы приведены результаты моделирования активного выпрямителя с адаптивным управлением, которое, однако, также было построено на основе моделей реальных полупроводниковых элементов в пакете LTSpice.

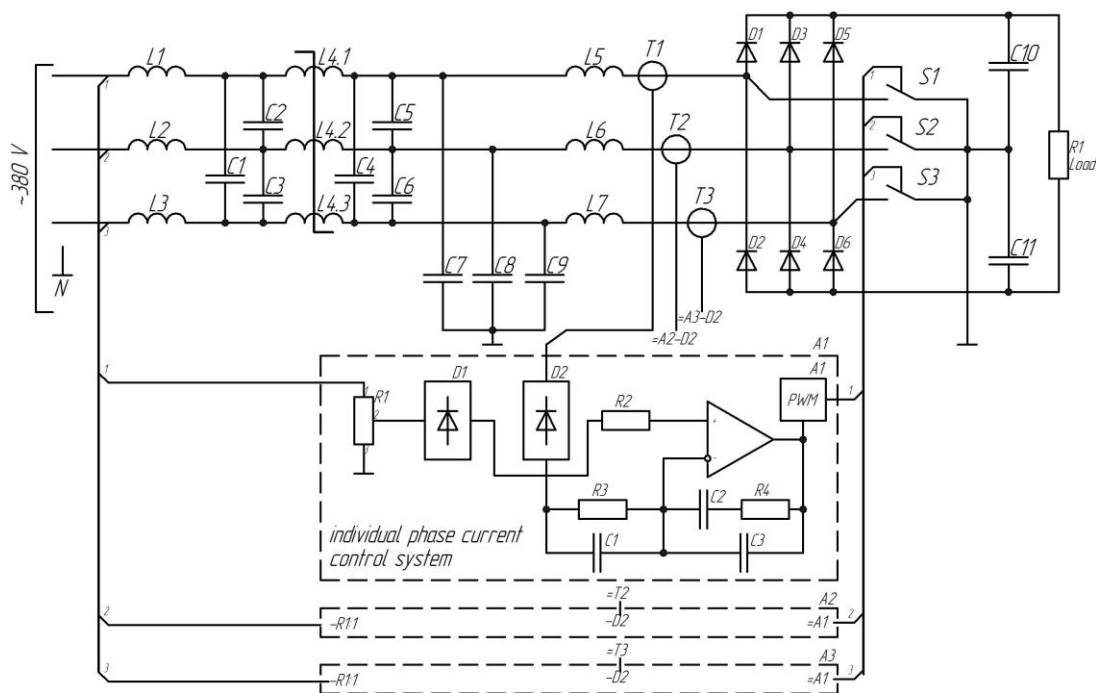


Рис. 4. Структурная схема исследуемой модели

Виенна-выпрямитель и другие активные корректоры коэффициента мощности достаточно широко рассмотрены в работах очень многих авторов [5], [6]. Однако численные расчеты активных корректоров, как правило, осуществляются с помощью сильно упрощенных моделей, практически не учитывающих свойств реальных полупроводниковых приборов и микросхем. Использование таких моделей позволяет достигать очень низких значений THD входного тока и характеристик близких к идеальным. Однако, что, конечно косвенно, спектральный состав сетевого напряжения промышленного предприятия, в парке которого достаточно современное оборудование, в состав которого также входят активные корректоры, демонстрирует удручающую картину. В большинстве случаев производителями в технических характеристиках корректоров не указывается достаточно данных для их интерпретации с точки зрения влияния на сеть: зачастую останавливаются на КПД и входном коэффициенте мощности, который, конечно же, высокий. Такие характеристики, как THD и или в каком частотном диапазоне THD был получен, обычно умалчиваются, ввиду того, что современные стандарты могут не ограничивать производителя, а проверяются лишь те характеристики, которые декларируются производителем.

В данной работе в модели Виенна-выпрямителя, учитывались, благодаря использованию моделей реальных полупроводниковых приборов и микросхем, например, такие параметры, как искажения, вносимые сигнальными выпрямителями, использующиеся в системе управления. В частности, данные аспекты позволяют получить более точную картину работы выпрямителя. В частности, не идеальность и не совершенство различных схем, в том числе при разных режимах работы, были использованы для достижения различных значений THD.

На рис. 5 приводится эпюра напряжения при работе сигнального выпрямителя, на которой отмечена точка с напряжением близким к нулю, в области которой наблюдаются наибольшие искажения, гораздо более ярко

проявляющиеся при преобразовании малоамплитудных сигналов.

На рис. 6 представлена эпюра выходного напряжения сигнального выпрямителя, где цифрой «2» отмечена работа выпрямителя, вносящего значительные искажения, а под цифрой «2» выпрямителя с более, в сравнении с «1», лучшими параметрами (близкими к идеальным).

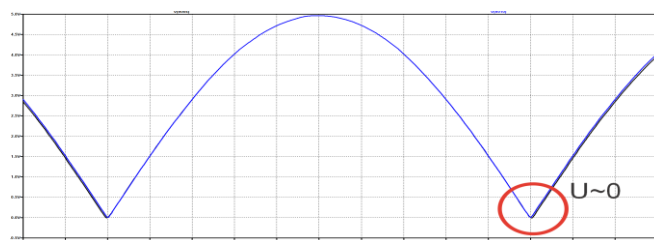


Рис. 5. Работа сигнального аналогового выпрямителя

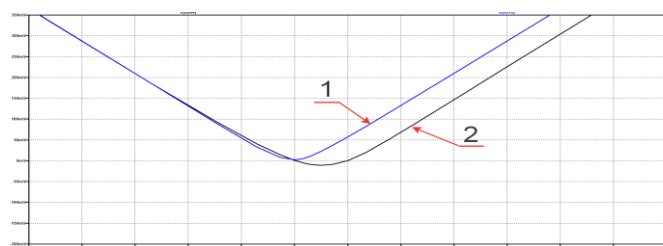


Рис. 6. Работа сигнального аналогового выпрямителя при низких значениях напряжения

Из рис. 6 видно, что эпюра напряжения сигнального выпрямителя, отмеченного цифрой «2» в точке близкой к нулю напряжения, пересекает ось абсцисс и принимает отрицательные значения, что в свою очередь приводит к сильным искажениям возмущающего воздействия автоматического регулятора, управляющего ШИМ контроллером.

На рис. 7 и 8 изображены эпюры фазных токов при разных принципах построения системы управления: самонастраивающейся и на основе ПИД регулятора соответственно.

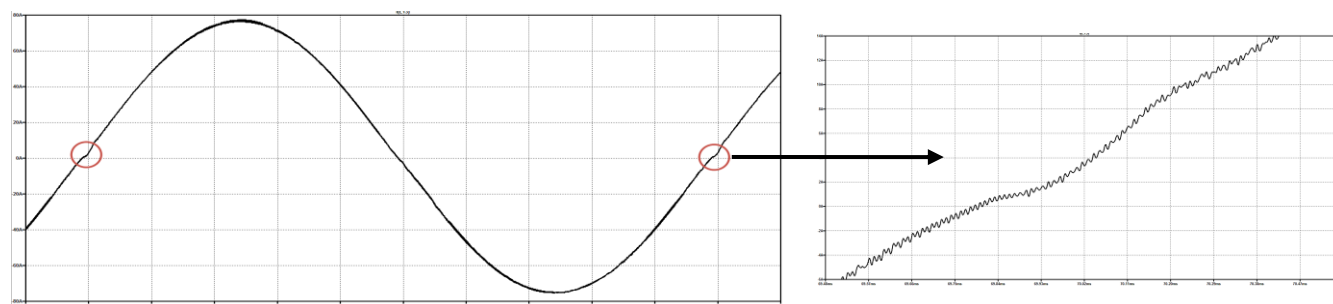


Рис. 7. Работа активного выпрямителя с самонастраивающейся системой управления



Рис. 8. Работа активного выпрямителя с ПИД регулятором в системе управления

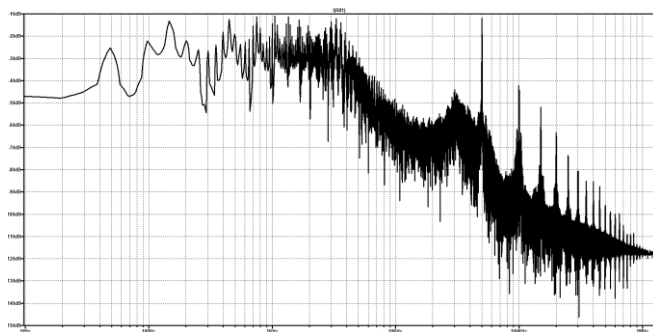


Рис. 9. Спектр тока нулевого проводника

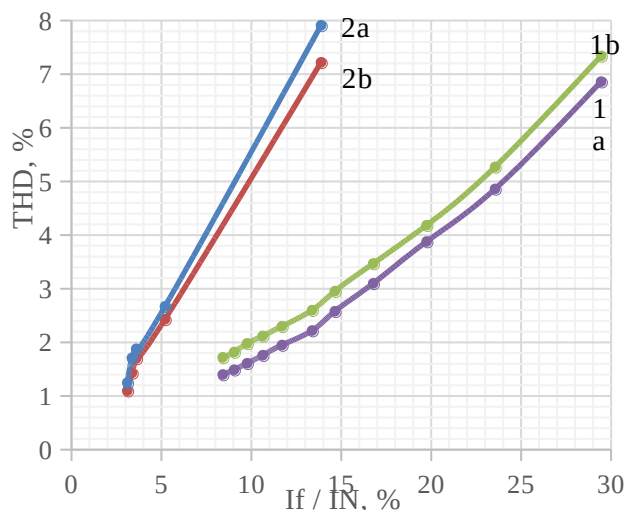


Рис. 10. Зависимость процентного соотношения тока нулевого проводника к току фазы (несимметрия токов) от THD входного тока активного выпрямителя

Как видно из рис. 7 и 8 основные искажения фазных токов наблюдаются в области нулевых значений. Во время протекания тока через ноль при ПИД регулировании имеется наибольшее перерегулирование, приводящее к наибольшим искажениям. В результате спектр тока нулевого проводника приобретает вид, представленный на рис. 9. По отношению к сетевой гармонике преобладают 3-я, 9-я, 15-я, 21-я, 27-я, 33-я и остальные нечетные гармоники, перечисляемые по арифметической прогрессии с шагом 6, а также гармоники кратные частоте работы выпрямителя равной 50 кГц. Таким образом, искажения тока по каждой фазе, генерируемые выпрямителем не компенсируются друг другом, а складываются и протекают, в том числе, через нулевой проводник.

По результатам исследования разработанных в рамках данной работы автором моделей были получены интегральные характеристики, характеризующие процентное соотношение тока нулевого проводника в зависимости от тока фазного (несимметрия токов), представленные на рис. 10. При этом представленные на рис. 10 зависимости получены при разных методах регулирования: 1 – система с ПИД регулированием, 2 – система с самонастройкой. При этом для расчета THD учитывалось разное количество гармоник, отмеченных соответствующими индексами: а – до 20-й гармоники, б – во всем измеряемом спектре тока (1,3 МГц). Изменение THD осуществлялось несколькими способами: изменением мощности потребляемой выпрямителем, изменением настроек регулятора, изменением режимов и схем работ сигнальных цепей

датчиков обратной связи, изменением задержек передачи управляющего сигнала до управления силовыми ключами.

Из рис. 10 видна прямая взаимосвязь THD входного тока и несимметрии фазных токов, однако для разных методов управления зависимости явно имеют разный характер. Это говорит о том, что помимо количественных характеристик искажения тока напрямую влияет и принцип управления выпрямителем. К примеру, при THD равным 5% при ПИД регулировании ток нулевого провода составит 23% от фазного – при самонастраивающейся системе ток нулевого провода будет приблизительно равен 10%, то есть разница оказывается существенной.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы была рассмотрена проблематика повышения энергоэффективности сетей электроснабжения за счет уменьшения циркулирующей в сети реактивной мощности, а также снижения гармонических искажений фазных токов, генерируемых потребителем. При низких значениях $\cos(\varphi)$ даже на первый взгляд, незначительное его повышение позволяет существенно уменьшить потери электроснабжения. Другим немаловажным фактором повышения энергоэффективности является снижение гармонических искажений тока, создаваемых потребителем.

Гармонические искажения осложняют организацию компенсации мощности, построенной на основе реактивных элементов из-за потенциально возможных резонансных взаимодействий устройств компенсации с элементами сети на частотах циркулирующих гармоник, которые приведут к увеличению потерь в элементах электроснабжения или выходу их из строя.

Активные компенсаторы мощности также являются источниками не только радиопомех, но и являются причиной несимметрии фазных токов из-за вносимых гармонических искажений тока на нечетных гармониках. При этом наблюдается взаимосвязь THD тока и несимметрии токов, однако при разных методах управления эти зависимости оказываются разными и начинают сходиться только при очень малых значениях THD. Что говорит о необходимости дополнительной характеристики активных корректоров не только в части их коэффициентов мощности, THD, но и той несимметрии токов, которую они создают, обобщающей те гармонические искажения, которые они генерируют.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 года N 1523-р.
- [2] Россети Центр: Операционные показатели. URL: <https://www.mrsk-1.ru/> (дата обращения: 01.01.2021).
- [3] Компенсация реактивной мощности. К вопросу о технико-экономической целесообразности / В. Овсейчук, Г. Трофимов, А. Кац и др. // Новости электротехники. 2008. №4.
- [4] Васильев А.С. Источники питания высокочастотных электротермических установок: монография / А.С. Васильев, Г. Конрад, С.В. Дзалиев. Новосибирск: НГТУ, 2006. 426 с.
- [5] Vienna Rectifier for DC Charging Pile / Jun Chou, Mingda Zhang, Sijin Wang, Yihui Sun, Jianyu Bao // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 768. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/768/6/062043.
- [6] Research of the Control Strategy of VIENNA Rectifier Circuit based on the Vector Control // Fengzhi Dai, Yuxuan Zhu, Di Yin, Yasheng Yuan // Atlantic press. DOI: <https://doi.org/10.2991/jmal.k.200512.003/>