



Научная статья

Определение сопротивления электрической сети при расчете режимов с искажениями в напряжении

А.Н.СКАМЬИН¹ , В.С.ДОБУШ¹, М.Х.ЖОПРИ²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Малаккский технический университет Малайзии, Малакка, Малайзия

Как цитировать эту статью: Скамьин А.Н., Добуш В.С., Жопри М.Х. Определение сопротивления электрической сети при расчете режимов с искажениями в напряжении // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 443-454. EDN LPAYJO. DOI: 10.31897/PMI.2023.25

Аннотация. В работе исследуется определение гармонического сопротивления системы электроснабжения горного предприятия. Данный параметр важен при расчете режимов с искажениями в напряжении, так как от его значения значительно зависят определяемые характеристики токов и напряжений на частотах высших гармоник, которые позволяют наиболее точно моделировать процессы при наличии искажений в напряжении и токе. Рассмотрена система электроснабжения подземных горных работ, характеризуемая значительной разветвленностью электрической сети и наличием мощных нелинейных электроприемников – одними из основных причин снижения качества электроэнергии на производстве. Модернизация процесса горного производства, внедрение систем автоматизированного электропривода, использование возобновляемых источников энергии, энергосберегающих технологий ведут к повышению энергоэффективности производства, но вместе с тем приводят к ухудшению качества электрической энергии, в частности, к повышению уровня высших гармоник в сети. Задача определения гармонического сопротивления системы электроснабжения решается с целью повышения качества проектирования и эксплуатации сетей электроснабжения горных предприятий с учетом особенностей их нагрузки при добыче твердых полезных ископаемых подземным способом. Рассмотрена возможность определения сопротивления системы на основе измерения нехарактерных высших гармоник, которые генерирует специальная нелинейная нагрузка. В качестве такой нагрузки рассматривается тиристорный регулятор мощности, работающий в режиме фазового регулирования выходного напряжения. Для обоснования предложенного способа используются имитационное компьютерное моделирование и экспериментальные исследования на лабораторном стенде. Даны рекомендации по выбору параметров нагрузки и местоположению подключаемых измерительных устройств.

Ключевые слова: высшие гармоники; качество электрической энергии; нелинейная электрическая нагрузка; тиристорный регулятор; искажения электрической энергии; гармоническое сопротивление сети

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10027.

Поступила: 26.10.2022

Принята: 13.02.2023

Онлайн: 04.05.2023

Опубликована: 19.07.2023

Введение. Развитие технологий добычи полезных ископаемых и их переработки характеризуется повышением энергопотребления и ростом автоматизации технологического процесса. Происходит внедрение новых технологий электротермической металлургии [1-3], применяются технологии возобновляемой энергетики для питания удаленных энергетических установок нефтегазовой сферы [4-6] и автономного электроснабжения с помощью гибридных установок [7, 8]. Новые технологические установки опираются на применение устройств силовой электроники, которые входят в состав различных полупроводниковых преобразователей. Это приводит к насыщению электрической сети токами высших гармоник. Негативные последствия искажения сетевого напряжения и тока известны и широко освещены [9-11].

Системы электроснабжения подземных горных работ имеют особенности – высокую протяженность линий электропередач, рассредоточенность мощных электрических установок [12-14]. Данное обстоятельство является одной из основных причин увеличения уровней искажений в напряжении, которые зависят от эквивалентного сопротивления питающей сети и от протекающих токов высших гармоник. При модернизации энергоемких установок на горном производстве,

таких как водоотливные, вентиляторные, электроподъемные и др., используется автоматизированная преобразовательная техника [15-17]. Такие установки повышают энергоэффективность технологического процесса, однако являются источниками искажения электрической энергии. Более подробно возможность моделирования таких приводов исследована в работах [18-20]. Прогнозирование уровней искажения электрической энергии при моделировании процессов в электрической сети при наличии высших гармоник является важной и актуальной задачей, стоящей перед проектировщиком или исследователем. В работе [18] подтверждается важность учета параметров качества электроэнергии при расчете электрических нагрузок и выборе параметров основного оборудования на горных предприятиях.

Сопротивление системы широко используется при расчете режимов работы системы электроснабжения предприятий, в том числе несинусоидальных режимов работы сети [21-23]. В работе [23] показано, что в зависимости от измеренных значений сопротивления системы можно определить доминирующий источник высших гармоник в точке общего присоединения потребителей. Одной из особенностей систем электроснабжения подземных горных работ является удаленность электрических нагрузок от источника питания, а значит и высокое сопротивление системы. При этом уровни искажений напряжения могут значительно превышать требования нормативных документов. Эффективность работы устройств компенсации гармонических искажений, например, пассивных фильтров гармоник, напрямую зависит от сопротивления питающей сети. Поэтому при выборе параметров таких устройств необходимо знать величину сопротивления системы на частотах высших гармоник. Сопротивление системы может помочь в определении источника загрязнения высшими гармониками, т.е. уладить споры между поставщиком электрической энергии и потребителем [24-26].

Сопротивление системы на высших гармониках может быть определено расчетным путем или с помощью измерений. Определение сопротивления системы на высших гармониках с помощью расчетов ведется из предположения его индуктивного характера и линейной зависимости от частоты:

$$X_s^{(n)} = nX_s^{(1)},$$

где n – номер гармоники; $X_s^{(1)}$ – индуктивное сопротивление сети на основной (первой) гармонике.

Такой способ прост и не требует применения дополнительного оборудования, однако при моделировании режимов работы энергосистемы точность определения уровней высших гармоник снижается. Это связано с тем, что сопротивление системы включает в себя резистивную и емкостную составляющие, и имеет нелинейный характер [27, 28]. Применение аналитического метода оценки сопротивления системы для ветряных турбин показано в работе [29]. Также сопротивление системы может изменяться с течением времени, т.е. обладать нестационарностью из-за подключения различных дополнительных нагрузок выше точки общего подключения [30, 31]. С другой стороны, применение измерительного метода более трудоемко, но дает более точные результаты [32, 33].

Среди измерительных методов можно выделить основанные на применении генераторов высших гармоник (инвазивные) и на измерении гармонических токов и напряжений для двух следующих друг за другом моментов времени (неинвазивные). Сравнение различных методов определения сопротивления системы приведено в статье [34]. Использование метода на основе генераторов высших гармоник требует дополнительного дорогостоящего оборудования, а также реализации функции измерения в сети гармоник с целью генерации специального сигнала, исключающего существующие в сети гармоники. Метод двух последовательных измерений более прост в применении, однако его принцип, основанный на изменении параметров нелинейных нагрузок с внешней или с внутренней стороны относительно точки общего присоединения, не позволяет точно измерять сопротивление сети на гармониках при одновременном изменении параметров нагрузки во внешней сети и сети электроснабжения рассматриваемого объекта. Оценка погрешности метода измерения сопротивления системы на основе колебаний нагрузок приведена в [35].



Еще одной проблемой при исследовании сопротивления системы электроснабжения подземных горных работ является то, что нагрузки могут быть резкопеременными во многих точках подключения, и сопротивление системы также может являться величиной нестационарной. Подходы к определению сопротивления системы в режиме реального времени описаны в [36, 37].

В данной работе предлагается метод измерения сопротивления сети на основе подключения дополнительной нелинейной нагрузки с определенным спектром высших гармоник, которая не требует больших затрат при внедрении. Однако, нелинейные нагрузки в своем составе могут иметь значительное внутреннее сопротивление, которое может зависеть от частоты, тем самым приближаясь по величине к сопротивлению системы на высших гармониках. Поэтому необходимо изучить влияние внутреннего сопротивления дополнительно подключаемой нелинейной нагрузки, параметров ее электропотребления и режимов работы.

Методы. Для определения сопротивления системы рассматриваемым методом необходимо использовать нелинейную электрическую нагрузку, которая удовлетворяет двум условиям. Во-первых, нелинейная нагрузка должна генерировать нехарактерные для системы электроснабжения высшие гармоники тока. Под нехарактерными гармониками нелинейной нагрузки понимаются гармоники, которые отсутствуют или крайне малы по величине в спектре напряжения сети при отсутствии выбранной нелинейной нагрузки. Во-вторых, у нелинейной нагрузки должно отсутствовать внутреннее сопротивление на высших гармониках, которую на схеме замещения можно представить в виде совокупности параллельно соединенных источников тока без дополнительных сопротивлений. Наличие внутреннего сопротивления у нелинейной нагрузки будет также искажать значение сопротивления системы, так как внутреннее сопротивление на схеме замещения будет соединено параллельно с сопротивлением системы и поэтому расчетное значение сопротивления системы будет меньше его реального значения. Указанные условия необходимо соблюдать для точного определения сопротивления системы на частотах высших гармоник. Наличие в схеме замещения, например, гармоники напряжения сети той же частоты, что и гармоника тока дополнительно подключаемой нелинейной нагрузки, приведет к ошибке расчета сопротивления системы на этой частоте, потому что необходимо учитывать влияние на расчет этого источника напряжения.

Рассмотрим обобщенную упрощенную схему электроснабжения подземных горных работ, связанных с добычей твердых полезных ископаемых (рис.1).

Электроснабжение подземных потребителей зависит от многих факторов: глубина разрабатываемых горизонтов, напряжение подземных электрических сетей, суммарная нагрузка и характер электроприемников, система разработки шахтного поля и др. Однако, все это сопряжено с увеличением длины питающих линий и рассредоточенностью электроприемников. Подавляющее большинство шахтных машин и механизмов приводится во вращение асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Широко используются регулируемые электроприводы на добычных и подготовительных участках угольных шахт. Для регулирования частоты вращения двигателей применяют шестипульсные полупроводниковые преобразователи частоты. В установках значительной мощности, где регулирование скорости не требуется (вентиляторы главного проветривания, компрессоры), широко применяются синхронные двигатели. В последнее время даже на мощных подъемных установках все чаще применяют мощные асинхронные двигатели с частотным регулированием, что приводит к проблемам в области качества электроснабжения с точки зрения высших гармоник. Применение находят устройства плавного пуска, выполненные по схеме тиристорных регуляторов напряжения, в частности, на конвейерных установках. Следует отметить, что существуют разработки и средства, позволяющие минимизировать влияние полупроводниковых преобразователей отдельных установок на сеть (активный выпрямитель, входные силовые активные и пассивные фильтры). Высокая стоимость таких устройств является одной из основных причин низких темпов их внедрения.

Таким образом, с точки зрения поставленной цели можно выделить основные моменты: в системах электроснабжения подземных горных работ присутствует нелинейная нагрузка с характерными для шестипульсных выпрямителей гармониками порядка $n = 6k \pm 1$, где $k = 1, 2, 3, \dots$; в спектре потребляемого тока также присутствуют гармоники, кратные двум, которые характеризуются небольшой продолжительностью ввиду применения в пусковых режимах электрооборудования;

электроснабжение потребителей имеет разветвленную радиальную сеть и резкопеременную нагрузку в разных точках подключения к сети.

В качестве нелинейной нагрузки, необходимой для определения сопротивления сети на высших гармониках, можно использовать специализированное полупроводниковое устройство, которое генерирует нехарактерные высшие гармоники для внешней системы электроснабжения. Его нагрузкой должны быть резистивные элементы, характеристики которых не зависят от частоты. По результатам опытов было выявлено, что такими нагрузками являются, например, тиристорный регулятор мощности (TPM) и неуправляемый выпрямитель без емкостного фильтра постоянного тока [38]. Неуправляемый выпрямитель имеет спектр, который включает в себя гармоники порядка $6k \pm 1$, которые часто встречаются во внешней сети электроснабжения. В спектре потребляемого тока TPM присутствуют гармоники, кратные двум, которые в большинстве случаев отсутствуют во внешней сети. Поэтому в качестве генератора нехарактерных высших гармоник был выбран TPM. Данный выбор имеет некоторые недостатки. Во-первых, TPM создает помимо нехарактерных гармоник еще и другие, в том числе и основную гармонику, величина которой во всех режимах больше остальных гармоник, что ведет к снижению эффективности работы установки в качестве измерителя сопротивления системы. Во-вторых, для увеличения точности результатов измерения необходимо увеличивать и мощность нагрузки TPM, следовательно, увеличиваются и габаритные размеры установки.

Таким образом, для измерения сопротивления системы необходимо:

- Убедиться в отсутствии нехарактерных гармоник напряжения во внешней сети при отключенном генераторе нехарактерных высших гармоник. При наличии во внутренней системе электроснабжения устройств, генерирующих гармоники, кратные двум, необходимо их отключить. Это представляется возможным ввиду незначительного количества таких устройств в системах электроснабжения подземных горных работ. В случае непродолжительного включения такого

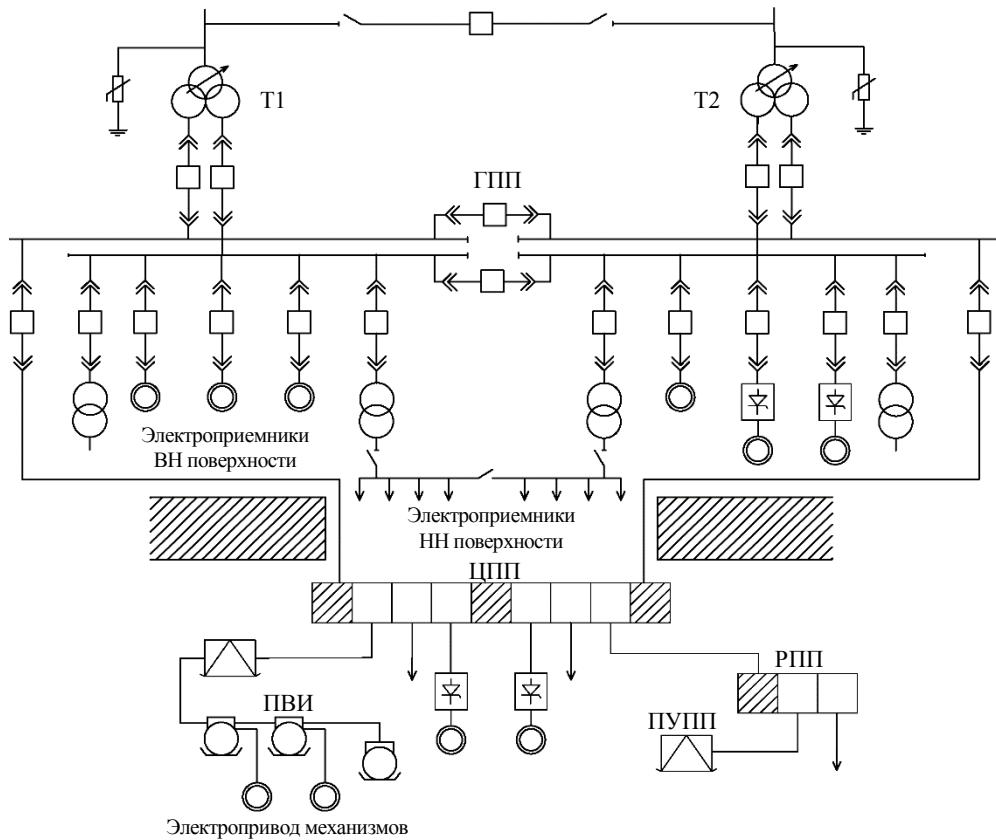


Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения горного производства
 ГПП – главная понизительная подстанция; ЦПП – центральная подземная подстанция;
 Т – силовые трансформаторы; ВН – высокое напряжение; НН – низкое напряжение;
 РПП – распределительный подземный пункт; ПУПП – передвижная участковая
 подземная подстанция; ПВИ – взрывобезопасные рудничные пускатели

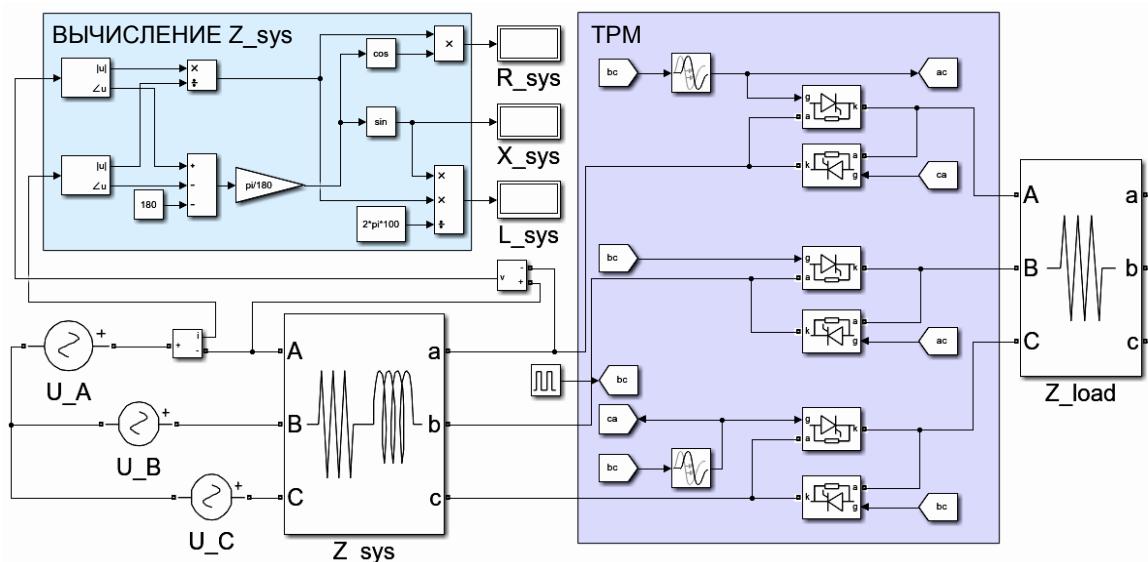


Рис.2. Имитационная модель Matlab/Simulink

рода устройств (например, в пусковых режимах двигателей) проведение предварительных измерений возможно без их отключения с осуществлением контроля таких периодов включения двигателей.

- Включить генератор нехарактерных гармоник. Устройства, генерирующие гармоники, кратные двум, также могут быть включены в работу (в данном случае необходимо учитывать местоположение такой нагрузки при проведении измерений).
- Снять осциллограммы тока и напряжения на входе генератора высших гармоник.
- Получить спектр тока и напряжения на входе генератора.
- Выполнить расчет сопротивления системы на нехарактерных высших гармониках.

Для проверки предлагаемого метода расчета сопротивления системы была создана имитационная модель в среде Matlab/Simulink (рис.2). Имитационная модель состоит из трехфазного симметричного источника (источники переменного синусоидального напряжения U_A , U_B , U_C), тиристорного регулятора мощности с системой управления (блок TPM), нагрузки тиристорного регулятора (блок Z_{load}), сопротивления системы (Z_{sys}) и блока измерения и расчета сопротивления системы (ВЫЧИСЛЕНИЕ Z_{sys}). Блок TPM состоит из трех пар встречно-параллельно соединенных тиристоров и работает в режиме фазового регулирования выходного напряжения. Блок ВЫЧИСЛЕНИЕ Z_{sys} выполняет расчеты сопротивления системы на основе осциллограмм фазного напряжения и тока тиристорного регулятора мощности. Разработанная модель применялась для определения сопротивления системы на высших гармониках при различных по величине и характеру сопротивлениях системы.

Верификация компьютерной модели проводилась на лабораторном стенде (рис.3), который состоит из трехфазного симметричного источника напряжения (1), тиристорного регулятора мощности (2), нагрузки в виде ТЭНов (3), трех катушек индуктивности (4) и измерителя напряжения и тока (5). В качестве регистрирующего прибора использовались осциллограф Rigol 1202 и анализатор качества электроэнергии Ресурс PQA. Полученные осциллограммы обрабатывались в Matlab.



Рис.3. Лабораторный стенд

Параметры тиристорного регулятора мощности и сопротивления системы приведены в таблице. Все параметры модели идентичны параметрам лабораторного стенда, а алгоритм работы модели тиристорного регулятора мощности полностью соответствует алгоритму работы реального устройства.

Параметры оборудования лабораторного стенда

Наименование оборудования	Параметры
Сопротивление системы	
Ступень 1	$R = 0,449 \text{ Ом}; L = 1 \text{ мГн}$
Ступень 2	$R = 1,12 \text{ Ом}; L = 4,1 \text{ мГн}$
Ступень 3	$R = 1,84 \text{ Ом}; L = 8,8 \text{ мГн}$
Нагрузка тиристорного регулятора	$R = 96 \text{ Ом}$
Тиристорный регулятор мощности	$I_{\text{ном}} = 30 \text{ А}$
Трехфазная сеть	$U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}$
Мощность короткого замыкания	
Ступень 1	263 кВА
Ступень 2	85 кВА
Ступень 3	44 кВА
Активное сопротивление системы	10 Ом
Емкостное сопротивление системы	2350 мкФ

Линейная индуктивность имеет три ступени регулирования, ее параметры приведены в таблице. Частотная характеристика индуктивности имеет линейный характер, что подтверждалось с помощью лабораторного источника переменной частоты от 0 до 500 Гц. В качестве допущения принимается, что сопротивление сети 10 кВ и выше не учитывается, так как его величина значительно меньше лабораторной линейной индуктивности.

Сопротивление системы может иметь сложную зависимость от частоты и состоять из разных по характеру сопротивлений. Были проведены эксперименты при различных типах сопротивления энергосистемы, которые в различной степени зависят от частоты, а также проверка метода на данных типах сопротивлений.

Обсуждение результатов. Компьютерная модель в системе Matlab/Simulink была верифицирована с помощью экспериментов на лабораторном оборудовании при различной загрузке TPM (от 0 до 50 %). Сравнивались осциллограммы TPM, полученные при моделировании и в результате измерений на лабораторном стенде. Подтверждением этому служат осциллограммы, представленные на рис.4. На рис.4, *a* представлено сравнение осциллограмм, полученных путем компьютер-

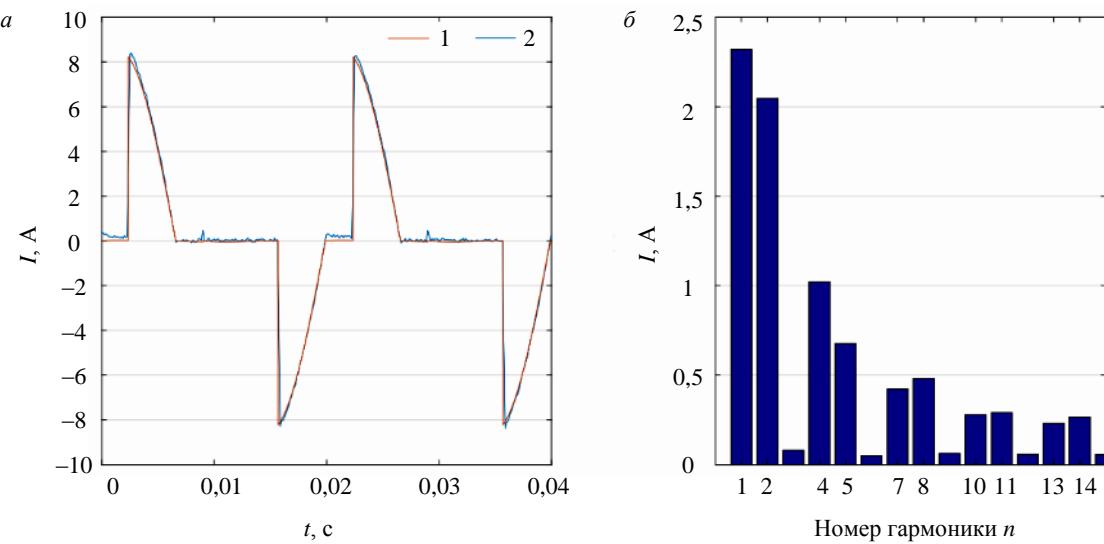


Рис.4. Осциллограмма (*a*) и спектр тока (*б*), потребляемого тиристорным регулятором



ного моделирования (1) и эксперимента на оборудовании (2). На рис.4, б представлен спектр потребляемого тока TPM.

Рассматриваемая компьютерная модель полностью подтвердила свою работоспособность на всех четных гармониках, т.е. были определены активное и реактивное сопротивление системы. Ошибка определения сопротивления системы на высших гармониках составляла менее 1 %. Таким образом подтверждается, что схема замещения модели на нехарактерных гармониках состоит только из источника тока нехарактерной гармоники и сопротивления системы. Поэтому комплексное сопротивление системы n -й гармоники может быть найдено по формуле

$$Z_S^{(n)} = \frac{\dot{U}^{(n)}}{\dot{I}^{(n)}},$$

где $\dot{U}^{(n)}$ – комплексное напряжение n -й гармоники; $\dot{I}^{(n)}$ – комплексный ток n -й гармоники.

Для проверки предложенного способа проведен эксперимент на лабораторном стенде. TPM работал в фазовом режиме управления и его загрузка изменялась от 0 до 50 %. При 100 %-ной нагрузке искажения тока равны нулю и нагрузка работает в полностью синусоидальном режиме, поэтому данный режим не рассматривался. На рис.5 представлены расчетные значения индуктив-

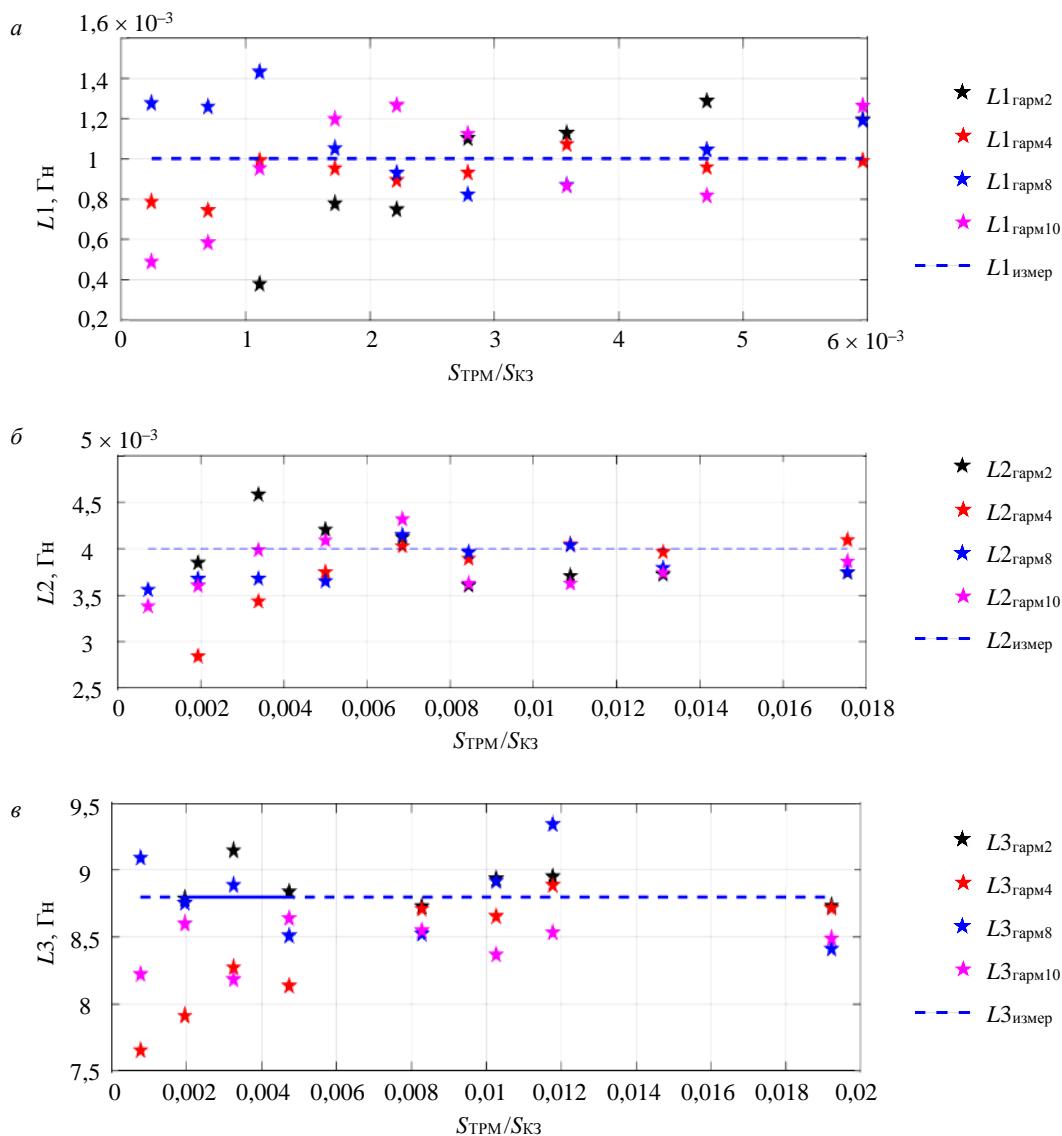


Рис.5. Расчетные значения индуктивности катушки $L1$ (a), $L2$ (б), $L3$ (в)
для гармоник 2, 4, 8, 10 при различной мощности TPM

ности катушки $L1$, $L2$, $L3$ для гармоник 2, 4, 8, 10 при различной мощности ТРМ. Важным параметром при определении сопротивления системы с помощью предложенного метода является мощность короткого замыкания. Это связано с тем, что при различных потребляемых гармонических токах на сопротивлении энергосистемы будет создаваться соответствующее падение напряжения на гармониках, которое может находиться в пределах погрешности измерительного прибора. Чтобы достичь необходимых значений токов и напряжений на гармониках, при проведении расчетов необходимо выявить диапазон соответствующих значений мощности ТРМ в зависимости от мощности короткого замыкания системы.

Характеристики, представленные на рис.5, отражают значения расчетной индуктивности на второй, четвертой, восьмой и десятой гармониках в зависимости от мощности ТРМ и мощности короткого замыкания в точке присоединения электроприемников. Пунктирной линией показано измеренное с помощью лабораторного источника значение индуктивности. Отношение мощности ТРМ к мощности короткого замыкания может служить критерием выбора мощности ТРМ, подходящего под исследуемую сеть. Исходя из полученных зависимостей, можно сделать следующие выводы:

- режимы работы ТРМ с минимальной загрузкой (5-15 %) можно отнести к выбросам, так как в этом случае значения второй гармоники тока и напряжения являются незначительным и расчет индуктивности имеет большую ошибку. Остальные режимы работы ТРМ подходят для измерения и расчета индуктивности системы и имеют незначительную погрешность;
- при учете остальных режимов работы ТРМ (20-50 %) среднее отклонение от измеренной величины индуктивности составляет менее 5 %;
- схему замещения ТРМ на высших гармониках действительно можно представить в виде параллельно соединенных источников тока без внутреннего сопротивления;
- при значении мощности ТРМ, равной 0,2 % от мощности короткого замыкания, индуктивность энергосистемы определяется с необходимой точностью.

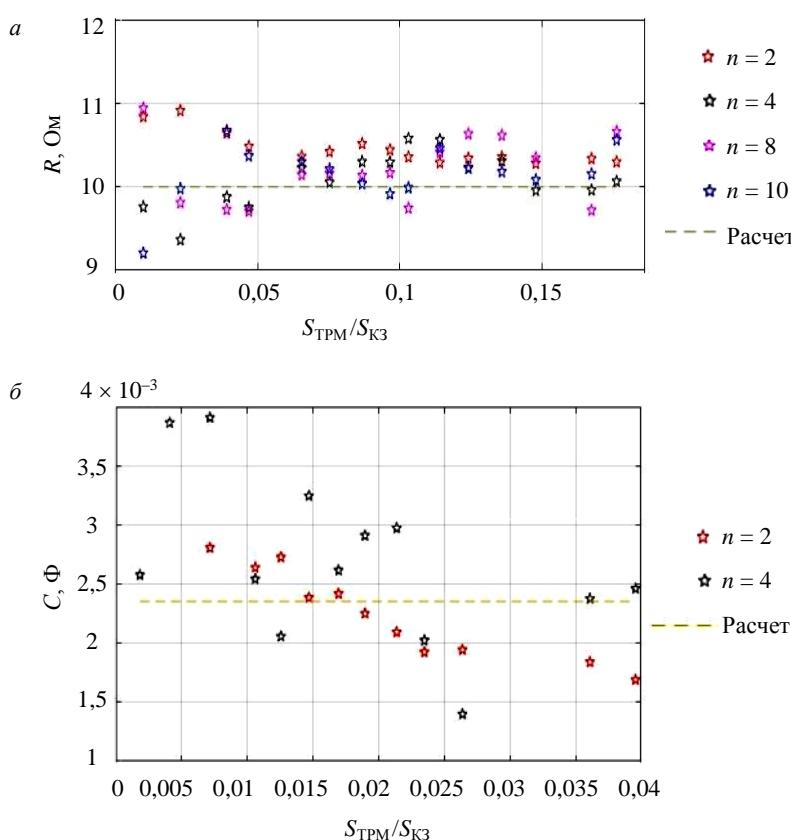


Рис.6. Измеренные значения сопротивления при активном (а) и емкостном (б) характере сети

Далее были проведены эксперименты для активного и емкостного сопротивлений системы с целью проверки полученных ранее выводов для данных типов сопротивлений. Результаты измерений для активного и емкостного сопротивлений представлены на рис.6.

Измерение активного сопротивления по данным проведенного эксперимента происходит с ошибкой менее 10 % от величины реального сопротивления (рис.6, а). Причем при загрузке ТРМ в промежутке от 25-45 % ошибка измерения не превышает 5 %. Ошибка измерения активного сопротивления системы практически не зависит от номера гармоник. Активное сопротивление измерялось в диапазоне 1-18 % от мощности короткого замыкания сети, т.е. для сети ТРМ являлся одной из наиболее мощных нагрузок. На рис.6, б представлена зависимость рассчитанной емкости сети на различных



частотах от отношения мощности TPM к мощности короткого замыкания системы. Емкостное сопротивление сети с помощью описываемого способа можно определить только с ошибкой 50 % на низкочастотных гармониках, что можно пояснить следующим образом. Во-первых, по причине малой величины сопротивления системы мощность TPM не превышает 4 % от мощности короткого замыкания сети в лабораторных условиях. Во-вторых, на более высоких частотах емкостное сопротивление становится еще меньше, поэтому достоверно измерить на этих гармониках токи и напряжения и рассчитать на их основе емкость сети не представляется возможным в лабораторных условиях.

В большинстве случаев для систем электроснабжения подземных горных работ сопротивление энергосистемы имеет активно-индуктивный характер, особенно для сетей среднего и низкого класса напряжений. Поэтому применение предложенного метода может быть реализовано без значительных увеличений мощности дополнительно подключаемой нелинейной нагрузки. Методика применения разработанного способа для определения сопротивления питающей сети системы электроснабжения подземных горных работ состоит из следующих этапов:

1. Анализ системы электроснабжения подземных горных работ на наличие нехарактерных искажений в напряжении питающей сети осуществляется на основе предварительных замеров показателей качества электроэнергии при отключенном генераторе нехарактерных сигналов и выявления типов силовых полупроводниковых преобразователей на производстве. При наличии полупроводниковых преобразователей, генерирующих нехарактерные искажения (гармоники, кратные двум), необходимо также их отключить на время измерений. В случае непродолжительного включения такого рода устройств (например, в пусковых режимах двигателей) проведение предварительных измерений возможно без их отключения с осуществлением контроля и исключения таких периодов включения двигателей из измеренных данных. При отсутствии нехарактерных гармоник в напряжении питающей сети осуществляется переход к следующему пункту. Наличие нехарактерных гармоник в напряжении питающей сети приводит к дополнительной погрешности при расчете гармонического сопротивления энергосистемы. Оценка такой погрешности в данной работе не проводилась.

2. Выбор мощности TPM определяется из мощности короткого замыкания в исследуемой точке сети:

$$\frac{S_{K3}}{S_{TPM}} \leq 500.$$

При проведении измерений в низковольтной электрической сети горного предприятия, которая в сравнении с сетями среднего и высокого класса напряжения характеризуется наихудшими показателями с точки зрения искажений, мощность TPM составит незначительную величину от единиц до десятков киловатт.

3. Выбор точек подключения измерительных устройств. Определяется участок сети (подстанция), на котором необходимо решить требуемую задачу – расчет уровней искажений в точке присоединения новых нелинейных потребителей, в точке присоединения потребителей при изменении параметров нагрузки и устройств компенсации реактивной мощности, в точке присоединения потребителей при установке устройств снижения гармоник и т.д. На рис.7 представлена упрощенная однолинейная электрическая схема, в рамках которой рассматривается подключение TPM и цепей измерения к выбранному участку сети.

В случае превышения нормативных показателей качества электроэнергии и необходимости выбора параметров устройств снижения гармоник, например на шинах подстанции НН, необходимо

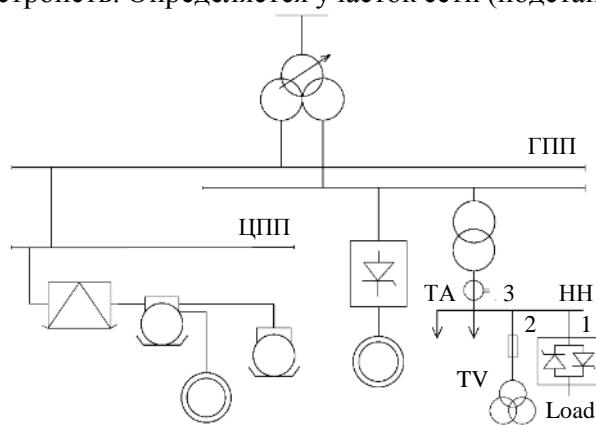


Рис.7. Упрощенная однолинейная электрическая схема
ТА – трансформатор тока; TV – трансформатор
напряжения

определить гармоническое сопротивление сети на этом присоединении. Подключение ТРМ осуществляется на шинах подстанции НН (точка 1), измерение фазного напряжения гармоник проводится также на шинах НН (точка 2). Наличие внутреннего сопротивления такой нелинейной нагрузки может быть минимизировано за счет корректного подключения измерительных цепей тока. В этом случае измерение токов гармоник проводится на вводном фидере подстанции (точка 3). Такой выбор точек подключения измерительных цепей распространяется и на другие классы напряжения.

В случае наличия на шинах подстанции НН дополнительных устройств, генерирующих такой же спектр нехарактерных гармоник, необходимо такое же подключение измерительных цепей тока на вводном фидере. Наличие таких устройств лишь увеличивает токи нехарактерных гармоник, протекающих по сопротивлению предвключенной сети. Следовательно, увеличивается напряжение нехарактерных гармоник в этой точке и точность расчета гармонического сопротивления сети. В случае наличия на предприятии в сети более высокого класса напряжения устройств, также генерирующих спектр нехарактерных гармоник, необходимо подключение измерительных устройств проводить на такой подстанции (например, ГПП). При этом на основе измерений определяется гармоническое сопротивление системы относительно шин ГПП. На подстанции НН сопротивление предвключенной сети будет отличаться лишь на параметры питающей линии от НН до ГПП.

4. Расчет гармонического сопротивления сети на основе измеренных данных нехарактерных токов и напряжений высших гармоник.

Заключение. Проведенные исследования подтверждают возможность измерения гармонического сопротивления системы на основе определения реакции на нехарактерные гармоники тока, генерируемые с помощью предложенного устройства в виде ТРМ. Применение такого устройства в качестве источника нехарактерных гармоник может быть реализовано для определения сопротивления системы на частотах высших гармоник, что подтверждается исследованиями на физической и математической моделях при отсутствии нехарактерных гармоник в напряжении питающей сети. ТРМ является дешевой и простой альтернативой более дорогостоящим генераторам высших гармоник.

В качестве критерия выбора мощности ТРМ для определения гармонического сопротивления системы необходимо использовать отношение мощности короткого замыкания сети к мощности ТРМ, подключаемого в том же узле. На основании анализа значений мощности короткого замыкания в системах электроснабжения подземных горных работ было выявлено, что мощность ТРМ составит от единиц до десятков киловатт в зависимости от места его подключения. Представлена методика применения предложенного способа для систем электроснабжения подземных горных работ, которая содержит этапы предварительного анализа сети и нагрузки, выбор требуемых параметров ТРМ и мест подключения измерительных цепей тока и напряжения при наличии и отсутствии дополнительных устройств, генерирующих спектр характерных и нехарактерных гармоник во внутренней системе электроснабжения предприятия.

Существуют несколько направлений для дальнейшего исследования. Во-первых, усовершенствование ТРМ для усиления только нехарактерных гармоник и уменьшения величины основной гармоники. Модернизация ТРМ или создание нового устройства на его основе должны привести к увеличению эффективности работы генератора гармоник и уменьшению, соответственно, тепловых потерь. Во-вторых, разработка методики учета нехарактерных гармоник, возникающих во внешней системе электроснабжения. В-третьих, применение предложенного способа при натуральных измерениях с целью измерения сопротивления системы на частотах высших гармоник и разработка методики обработки измеренных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бааке Э., Шпенст В.А. Последние научные исследования в сфере электротермической металлургической обработки // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 660-668. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.660
2. Шклярский Я.Э., Шклярский А.Я., Замятин Е.О. Анализ потерь электроэнергии алюминиевого производства при наличии искажений в системе электроснабжения // Цветные металлы. 2019. № 4. С. 84-91. DOI: 10.17580/tsm.2019.04.11



3. Халифа А.А., Бажин В.Ю., Устинова Я.В., Шалаби М.Э.Х. Изучение особенностей кинетики процесса получения окатышей из красного шлама в потоке водорода // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 261-270. DOI: 10.31897/PMI.2022.18
4. Kroposki B., Johnson B., Yingchen Zhang et al. Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy // IEEE Power and Energy Magazine. 2017. Vol. 15. Iss. 2. P. 61-73. DOI: 10.1109/MP.2016.2637122
5. Nikulin A.N., Epifancev K.V., Kovshov S.V., Korshunov G.I. The research of possibility to use the machine for biofuel production as a mobile device for poultry farm waste recycling // Life Science Journal. 2014. Vol. 11. № 4. P. 464-467.
6. Zhukovskiy Y.L., Vasilev B.Y., Korolev N.A., Malkova Y.M. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit // Indonesian Journal of Science and Technology. 2022. Vol. 8. № 1. P. 65-78. DOI: 10.17509/ijost.v8i1.51983
7. Morenov V., Leusheva E., Lavrik A. et al. Gas-Fueled Binary Energy System with Low-Boiling Working Fluid for Enhanced Power Generation // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 7. P. 1-15. DOI: 10.3390/en15072551
8. Шклярский Я.Э., Герра Д.Д., Яковлева Э.В., Рассылкин А. Влияние солнечной энергетики на развитие горнодобывающей отрасли в Республике Куба // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 427-440. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.12
9. Benaoadj M., Boumous Z., Boumous S. Active Harmonic Filtering for Improving Power Quality of an Electrical Network // Journal Européen des Systèmes Automatisés. 2022. Vol. 55. № 3. P. 397-403. DOI: 10.18280/jesa.550312
10. Ruuskanen V., Koponen J., Kosonen A. et al. Power quality and reactive power of water electrolyzers supplied with thyristor converters // Journal of Power Sources. 2020. Vol. 459. № 228075. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228075
11. Zhukovskiy Y., Tsvetkov P., Buldysko A. et al. Scenario Modeling of Sustainable Development of Energy Supply in the Arctic // Resources. 2021. Vol. 10. Iss. 12. № 124. DOI: 10.3390/resources10120124
12. Бельский А.А., Моренов В.А., Купавых К.С., Сандыга М.С. Электроснабжение станции нагрева нефти в скважине от ветроэлектрической установки // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 2. С. 146-154. DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154
13. Alexandrov V.I., Kopteva A.V., Serzan S.L. Effective Parameters of Tail Processing of Gold-Bearing Ore Hydrotransport for Verninskaya Processing Factory // Key Engineering Materials. 2020. Vol. 836. P. 25-35. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.836.25
14. Abdallah W.J., Hashmi K., Faiz M.T., Flah A., Channumsin S., Mohamed M.A., Ustinov D.A. A Novel Control Method for Active Power Sharing in Renewable-Energy-Based Micro Distribution Networks // Sustainability. 2023. Vol. 15. № 1579. DOI: 10.3390/su15021579
15. Муньос-Гихоса Х.М., Крыльцов С.Б., Соловьев С.В. Применение активного выпрямителя в качестве компенсатора токов искажений в распределительных сетях 6-10 кВ // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 229-238. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.229
16. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Abdallah W.J. Modified proportional integral controller for single ended primary inductance converter // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2022. Vol. 13. № 2. P. 1007-1025. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp1007-1025
17. Raj L.R.L.V., Jidin A., Abdul Karim K. et al. Improved torque control performance of direct torque control for 5-phase induction machine // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2013. Vol. 3. № 4. P. 391-399. DOI: 10.11591/ijpeds.v3i4.5249
18. Lingom P.M., Song-Manguelle J., Doumbia M.L. et al. Electrical Submersible Pumps: A System Modeling Approach for Power Quality Analysis with Variable Frequency Drives // IEEE Transactions on Power Electronics. 2022. Vol. 37. Iss. 6. P. 7039-7054. DOI: 10.1109/TPEL.2021.3133758
19. Yerbayev Y., Artyukhov I., Zemtsov A. et al. Negative Impact Mitigation on the Power Supply System of a Fans Group with Frequency-Variable Drive // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 23. № 8858. DOI: 10.3390/en15238858
20. Jopri M.H., Abdullah A.R., Manap M. et al. An Improved Of Multiple Harmonic Sources Identification In Distribution System With Inverter Loads By Using Spectrogram // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2016. Vol. 7. № 4. P. 1355-1365. DOI: 10.11591/ijpeds.v7.i4.pp1355-1365
21. Shawon M.H., Barczentewicz S.H., Bień A., Hanelka Z. Localization of Harmonic Sources in Power System – Simulation and Laboratory Study // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2016. № 14. P. 546-551. DOI: 10.24084/repqj14.388
22. Martinez R., Castro P., Arroyo A. et al. Techniques to Locate the Origin of Power Quality Disturbances in a Power System: A Review // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 12. № 7428. DOI: 10.3390/su14127428
23. Srikanth P., Koley C. Deep learning and signal processing based algorithm for autorecognition of harmonic loads // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. 2022. Vol. 42. № 2. P. 1171-1184. DOI: 10.3233/JIFS-189780
24. Kasemuan S.M., De Beer A.S., Pretorius J.H.C. A Practical Method to Identify Contributions of Harmonics in Power Systems: Method and Application // International Review of Electrical Engineering. 2021. Vol. 16. № 4. P. 304-315. DOI: 10.15866/iree.v16i4.19194
25. Mokoena B., Eboule P.S.P., Pretorius J.H.C. Medium voltage consumers' cost evaluation connected to a micro-grid PV system // Energy Reports. 2022. Vol. 8. S. 10. P. 235-244. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.05.105
26. Jopri M.H., Abdullah A.R., Sutikno T. et al. A Diagnostic Analytics of Harmonic Source Signature Recognition by Using Periodogram // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2018. Vol. 8. № 6. P. 5399-5408. DOI: 10.11591/ijece.v8i6.pp5399-5408
27. Ebadi M., Bayat M., Asadi H. Evaluating maximum permissible feeder current in capacitive compensated harmonic polluted networks introducing Apparent RMS Current Ratio Index (ACRI) // Electric Power Systems Research. 2020. Vol. 187. № 106511. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106511
28. Yaqiong Li, Zhanfeng Deng, Tongxun Wang et al. Coupled Harmonic Admittance Identification Based on Least Square Estimation // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 10. № 2600. DOI: 10.3390/en11102600

29. *Xia Zhou, Yishi Liu, Ping Chang et al.* Voltage Stability Analysis of a Power System with Wind Power Based on the Thevenin Equivalent Analytical Method // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Iss. 11. № 1758. DOI: 10.3390/electronics11111758
30. *Ahmed E.F., Said E.-S.S.A., Abdel Mageed H.M., Ammar A.A.* A novel interactive technique for load current harmonic reduction for any randomly utilized household equipment // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022. Vol. 13. № 4. P. 2159-2171. DOI: 10.11591/ijped.v13.i4.pp2159-2171
31. *Azebaze Mboving C.S., Hanzelka Z., Firlit A.* Analysis of the Factors Having an Influence on the LC Passive Harmonic Filter Work Efficiency // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 5. № 1894. DOI: 10.3390/en15051894
32. *Singh R.S., Ćuk V., Cobben S.* Measurement-Based Distribution Grid Harmonic Impedance Models and Their Uncertainties // *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 16. № 4259. DOI: 10.3390/en13164259
33. *Wanjun Lei, Cheng Nie, Mingfeng Chen et al.* A Fast-Transient Repetitive Control Strategy for Programmable Harmonic Current Source // *Journal of Power Electronics*. 2017. Vol. 17. Iss. 1. P. 172-180. DOI: 10.6113/JPE.2017.17.1.172
34. *Kanálik M., Margitová A., Bena L., Kanáliková A.* Power System Impedance Estimation Using a Fast Voltage and Current Changes Measurements // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 1. № 63. DOI: 10.3390/en14010063
35. *Yang Wang, Wilsun Xu, Jing Yong.* An Adaptive Threshold for Robust System Impedance Estimation // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019. Vol. 34. Iss. 5. P. 3951-3953. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2924349
36. *Sommer S., Aabrandt A., Jóhannsson H.* Reduce-factor-solve for fast Thevenin impedance computation and network // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2019. Vol. 13. Iss. 2. P. 288-295. DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.5330
37. *Ziteng Liu, Yonghai Xu, Haiwei Jiang, Shun Tao.* Study on Harmonic Impedance Estimation and Harmonic Contribution Evaluation Index // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 59114-59125. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2982950
38. *Skamyin A., Shklyarskiy Y., Dobush V., Dobush I.* Experimental Determination of Parameters of Nonlinear Electrical Load // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 22. № 7762. DOI: 10.3390/en14227762

Авторы: А.Н.Скамьин, канд. техн. наук, доцент, skamin_an@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7738-7539> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), В.С.Добуш, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-9401-5638> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), М.Х.Жопри, PhD, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-6902-0099> (Малаккский технический университет Малайзии, Малакка, Малайзия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.