

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Пудкова Тамара Валерьевна



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИ
НАЛИЧИИ ИСКАЖЕНИЙ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические
комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Шклярский Я.Э.

Санкт-Петербург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ОЦЕНКА И ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПАРАМЕТРОВ СЕТИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ РЕЖИМЕ.....	12
1.1 Анализ распределительных сетей электротехнических комплексов предприятий среднего напряжения	12
1.2 Анализ действующих нормативных документов, определяющих оценку, измерение показателей качества электроэнергии и параметров сети при несинусоидальном режиме.....	19
1.2.1 Организация стандартизации.....	19
1.2.2 Показатели качества электроэнергии при несинусоидальном режиме работы сети	22
1.2.3 Примечания и недостатки действующих нормативных документов в отношении измерения ПКЭ при несинусоидальном режиме работы сети	37
1.3 Оценка и средства измерения параметров режимов сети и показателей качества электроэнергии	40
1.4 Влияние несинусоидальности на учет электроэнергии	45
1.5 Выводы по Главе 1.....	48
ГЛАВА 2 ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ НА УРОВЕНЬ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ.....	51
2.1 Зависимость суммарного коэффициента искажения по напряжению от коэффициента отношения составляющих полного сопротивления ..	52
2.2 Зависимость суммарного коэффициента искажения по напряжению от мощности короткого замыкания.....	57
2.3 Выводы по Главе 2.....	67
ГЛАВА 3 УЧЕТ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ НАЛИЧИИ ИСКАЖЕНИЙ	69

3.1 Особенность учета электроэнергии при синусоидальном режиме..	69
3.2 Подходы к учету электроэнергии	70
3.3 Применение сертифицированных применяемых приборов учёта электроэнергии	74
3.4 Лабораторные исследования влияния высших гармоник на учет потребления электроэнергии.....	79
3.5 Учет электроэнергии при изменении параметров сети, связанных с влиянием высших гармоник.....	85
3.6 Выводы по Главе 3.....	91
ГЛАВА 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЕ СЕТИ	93
4.1 Затраты на электроэнергию.....	93
4.2 Влияние нелинейной нагрузки на уровень несинусоидальности на линейной.....	96
4.3 Целесообразность оплаты реактивной мощности	102
4.4 Применение статических компенсаторов и активных фильтров для уменьшения затрат на электроэнергию.....	104
4.4.1 Метод анализа спектра напряжения и тока.....	105
4.5 Алгоритм учета потребления электроэнергии	114
4.6 Выводы по Главе 4.....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	120
ПРИЛОЖЕНИЕ А Расчетная схема первого предприятия среднего напряжения.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Расчетная схема третьего предприятия среднего напряжения.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ В Зависимость суммарного коэффициента искажения от изменения сопротивлений на линиях	136

ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	137
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Справка о внедрении результатов диссертационной работы производственную деятельность	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Функционирование современных электротехнических комплексов и систем невозможно без применения приборов, регистрирующих необходимые данные о различных состояниях процессов в электрических сетях [4; 31]. К таким устройствам относятся счётчики - приборы учета электроэнергии, по которым определяются значения активной, реактивной и полной мощностей.

Поскольку счётчики электроэнергии применяют для двух видов учёта (коммерческого и технического), то неточность показаний таких приборов ведет к проблемам как минимум в двух направлениях: техническом и экономическом. С технической стороны это может приводить к некорректной настройке других приборов и оборудования, работающих на основании снятых показаний. С экономической стороны это ведет к переплате/недоплате за электроэнергию.

Согласно такому федеральному документу, как «Прогноз развития энергетики мира и России до 2040», опубликованном Институтом энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН), «Энергетической стратегии России до 2030 года», опубликованной на сайте Министерства энергетики РФ, концепции «Энерджинет», которая является одной из девяти дорожных карт Национальной технологической инициативы, а также современных общемировых тенденций в сторону «Индустрии 4.0» спрос на электроэнергию и её «умное» потребление будет расти. Это значит, что вопросы учета и распределения энергии будут актуальны, как в течение переходного периода, так и в установившемся процессе после перехода. Принимая во внимание тенденцию к интеграции систем энергоснабжения, в которой разрозненные в управлении системы электро-, тепло-, холодо- и газоснабжения образуют «систему систем», требования к энергетике меняются. При этом, в результате перехода на «энергоэффективное мышление», роль человека меняется от потребителя к активному субъекту (просьюмеру) рынка в интегрированных интеллектуальных системах.

Таким образом, решение вопроса корректности учета потребляемой электроэнергии встает особенно остро. Сейчас это касается в большей степени крупные предприятия электротехнического комплекса, но, согласно вышеуказанным прогнозам и планам, в определенный момент времени коснется и обычного потребителя, который также станет активным участником рынка. Интерес любого участника рынка, чтобы оплата за электроэнергию проводилась максимально компетентно, учитывая рост нелинейной нагрузки среди потребителей социального сектора.

Резюмируя вышеизложенное, решение задач по совершенствованию учета электроэнергии измерительными приборами в условиях несинусоидальности является необходимым и актуальным, как в настоящее время, так и в будущем, как для действующих участников рынка – предприятий, так и потенциальных – активных потребителей.

Степень проработанности исследуемого направления

Принцип расчета полной мощности и её компонентов в электрических сетях при синусоидальном режиме не является дискуссионной задачей. В случае несинусоидального режима (симметричного и несимметричного) выявление расчетных формул для отдельных компонентов полной мощности, как и самих компонентов, является нетривиальной задачей.

Существует множество подходов к учету электроэнергии при несинусоидальном режиме и оживленные дискуссии ведутся до сих пор. Первыми авторами, кто отметил необходимость уточнения расчета мощности стали С. Р. Steinmetz (1895-1920) [103; 104] и М. Iljovic (1925) [46]. Затем свой значительный вклад в развитие теории внесли С. I. Budeanu (1927) [63; 82] и S. Fryze (1932) [18; 63]. Далее, наиболее широкое распространение получили теории авторов, которые совершенствовали эти две базовые теории и разрабатывали свои: P. S. Filipski (1980-1994) [73–75]; A. E. Emanuel (1977-2017) [66; 69–71; 75; 91; 92; 95; 97]; W. Shepherd и P. Zakikhani (1972) [102]; D. Sharon (1973-2008) [100; 101]; W. J. M. Moore и N. L. Kusters (1980-2017) [85]; C. H. Page (1980) [94]; H. Akagi и др. (1984) [50; 51]; M. Depenbrock, D. A. Marshal и J. D. van

Wyk (1993) [67]; E. W. Kimbark (1995) [84]; F. D. Yildirim и W. Fuchs (1999) [105]; L. S. Czarnecki (1987-2018) [57; 57–59; 61; 63; 65]. Из российских учёных вклад внесли Железко Ю.С. [17], Жемеров Г.Г. [18], Жежеленко И.В. [13–15], Розанов Ю.К. [37], Смирнов С.С. [40; 41; 43]. На данный момент в действующем стандарте качества электроэнергии ГОСТ 32144-2013 (IEEE. Standard 1459-2010. IEEE Power and Energy Society) учитываются наработки А. Е. Emanuel.

Однако ни в ГОСТах, ни в работах перечисленных авторов не рассмотрено влияние параметров электрической сети в части состава спектра, соотношения линейной к нелинейной нагрузке и влияния сопротивления системы на выбор методики, применяемой для учета электроэнергии в электрических сетях с искажениями.

Тема и содержание диссертации соответствуют научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы по следующим пунктам областей исследований: п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Объект исследования – электротехнические комплексы предприятий, имеющие в своем составе нелинейную нагрузку.

Предмет исследования – системы учета потребления электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий в сети среднего напряжения.

Идея работы

Учет потребления электроэнергии зависит от наличия искажений в сети электротехнического комплекса предприятий, при этом полную мощность необходимо разделять на активную и неактивную, учитывающую другие виды

мощности, возникающие при наличии искажений. В свою очередь, несинусоидальность напряжений и токов в сети необходимо оценивать по характеристикам сети и взаимному влиянию линейной/нелинейной нагрузок при условии быстрого определения степени несинусоидальности.

Цель работы – совершенствование учета потребления электроэнергии для электротехнических комплексов предприятий за счёт введения дополнительных факторов, повышающих корректность учета активной и реактивной мощности.

Задачи исследования

1. Анализ параметров СЭС среднего напряжения на предмет изменяющихся параметров, связанных с несинусоидальным режимом работы сети, и определение диапазона их изменения;
2. Анализ нормативных документов с целью выявления вводимых ограничений, непосредственно влияющих на учет потребления электроэнергии;
3. Анализ принципов измерения потребления электроэнергии в условиях несинусоидальности при эксплуатации сертифицированных счетчиков;
4. Выявление показателей, определяющих влияние параметров распределительной сети на учет потребления электроэнергии;
5. Разработка компьютерной модели электротехнического комплекса для анализа влияния искажений на учет потребления электроэнергии;
6. Анализ влияния скорости выявления спектра высших гармоник на изменение затрат по оплате электроэнергии;
7. Разработка алгоритма учета электроэнергии в сети в электротехнических комплексах предприятий при наличии искажений

Научная новизна

1. Введен новый показатель $k_Z^{(h)} = R_S / X_S^{(h)}$, влияющий на ограничения по току на высших гармониках и доказана зависимость THD_U от его величины с учетом изменения модуля полного сопротивления системы питающей электросети