



**Некоммерческое партнерство  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ  
Единой энергетической системы»**

111 250, Москва, проезд Завода Серп и Молот,  
дом 10, офис 608, Тел. (495) +7 495 012 60 07  
E-mail: dtv@nts-ees.ru, <http://www.nts-ees.ru/>  
ИНН 7717150757



Основана в 1724 году

Российская Академия Наук  
Секция по проблемам НТП в энергетике  
Научного совета РАН по  
системным исследованиям в энергетике

**УТВЕРЖДАЮ**

Президент, Председатель  
Научно-технической коллегии,  
д.т.н., профессор

Н.Д. Роголев

«07» июня

2023 г.

**ПРОТОКОЛ № 6**

совместного заседания Секции «Активные системы распределения  
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и  
Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным  
исследованиям в энергетике

21 июня 2023 года

г. Москва

**Присутствовали:** члены секции «Активные системы распределения  
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС»,  
сотрудники ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», ООО «РТСофт-СГ», НП «НТС ЕЭС»,  
АО «НТЦ ФСК ЕЭС», НИК С6 РНК СИГРЭ, ФГБУН «ИНЭИ РАН», ФГБУН  
«ИСЭМ СО РАН», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-  
экономический университет», ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный  
университет», ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ФГБОУ ВО  
«Новосибирский государственный технический университет (НЭТИ)», ФГАОУ  
ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,  
ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева», всего **36** человек.

Со вступительным словом выступил председатель секции «Активные  
системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические

ресурсы», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. Илюшин П.В.

Во вступительном слове было отмечено, что строительство собственных распределенных источников энергии на невозобновляемых и возобновляемых источниках энергии позволяет потребителям получать доступную электрическую и тепловую энергию в требуемых объемах, обеспечить надежность собственного электро- и теплоснабжения, а также стабильную цену на указанные виды энергии в долгосрочной перспективе. При этом системы электроснабжения потребителей вынужденно функционируют в изолированном или островном режимах. В первом случае из-за отсутствия сетей централизованного электроснабжения в месте размещения потребителя или технической и экономической нецелесообразности присоединения к ним, а во втором случае – из-за аварийного или планового отключения линии электропередачи, связывающей энергорайон с энергосистемой. В этих режимах необходимо обеспечить надежное функционирование электроприемников потребителей, а для этого требуется реализовать соответствующие интеллектуальные алгоритмы в системе автоматического управления энергорайона. Совершенствование методических основ проектирования энергорайонов с распределенными источниками энергии является актуальной задачей, позволяющей решить поставленные задачи.

С докладом **«Моделирование и разработка методик управления изолированными или находящимися в островном режиме работы энергорайонами с распределенными источниками энергии»** выступил Косарев Борис Андреевич, к.т.н., доцент кафедры «Электрическая техника» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет».

Основные положения доклада приведены ниже. Презентация доклада прилагается (**Приложение 1**).

1. Была разработана имитационная модель изолированного или находящегося в островном режиме работы энергорайона с коммунально-бытовой нагрузкой с распределенными источниками энергии. Приведены параметры схемы замещения типовых электроприемников энергорайона.

Имитационная модель позволяет рассчитать потокораспределение в энергорайоне, комплексные значения токов и напряжений, частоту, а также угол нагрузки генераторов. Представленная модель позволяет выполнять расчеты гармонических искажений тока и напряжения.

Согласно результатам моделирования в точке присоединения нагрузки жилых зданий коэффициенты искажения синусоидальности кривой тока и напряжения составляют 21,67 % и 8,88 % соответственно. Спектр гармонических

составляющих тока представлен в основном нечетными гармониками 3 (16,50 %), 5 (8,88 %), 7 (5,81 %), 9 (6,07 %), 11 (5,53 %), 13 (2,64 %) порядков. Спектр гармонических составляющих напряжения представлен в основном нечетными гармониками 3 (7,31 %), 5 (1,58 %), 7 (3,16 %), 9 (0,39 %), 11 (1,98 %), 13 (0,24 %) порядков.

Имитационная модель верифицирована по результатам измерений гармонических искажений тока и напряжения в системе электроснабжения коттеджного поселка.

2. Был разработана имитационная модель изолированного или находящегося в островном режиме работы промышленного энергорайона с распределенными источниками энергии. Приведены параметры схем замещения типовых электроприемников промышленного энергорайона.

Имитационная модель позволяет рассчитать потокораспределение в энергорайоне, комплексные значения токов и напряжения, частоту, а также угол нагрузки генераторов. Представленная модель позволяет выполнять расчеты гармонических искажений тока и напряжения.

Согласно результатам моделирования в точке присоединения нагрузки промышленного предприятия коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжению составляют 44,33 % и 7,34 % соответственно. Спектр гармонических составляющих тока представлен следующими гармониками: 2 (1,2 %) 3 (41,21 %), 4 (0,17 %), 5 (5,89 %), 7 (2,82 %), 9 (1,94 %), 11 (1,41 %), 13 (0,6 %) порядков. Спектр гармонических составляющих напряжения представлен следующими гармониками: 2 (0,23 %), 3 (4,44 %), 4 (0,03 %), 5 (0,34 %), 7 (0,52 %), 9 (0,29 %), 11 (0,08 %), 13 (0,06 %) порядков.

3. Предложена методика управления изолированным или находящимся в островном режиме работы энергорайоном с распределенными источниками энергии. Методика управления состоит из следующих операций:

1) Задание параметров эталонной синусоиды напряжения ( $U_m$  – амплитуда,  $f_{ном}$  – номинальная частота);

2) Формирование массива значений эталонной синусоиды:

2.1. Вычисление периода эталонной синусоиды  $T = \frac{1}{f_{ном}}$ ;

2.2. Разбиение периода  $T$  на  $n$  равных отрезков ( $n$  – целое число). Длина отрезка (шага)  $\Delta T$  составляет  $\frac{T}{n} = \frac{1}{f_{ном} \cdot n}$ ;

Согласно требованиям к качеству электроэнергии предельно допустимое отклонение частоты составляет 0,4 % от номинального значения 50 Гц в изолированных энергорайонах. Тогда предельно допустимое отклонение значения периода  $T$  составляет 1/6300 с. Поэтому в методике выбрано значение шага  $\Delta T \geq \frac{1}{3150}$  с.



2.3. Вычисление значений эталонной синусоиды  $U_s(t) = U_m \sin(2\pi f_{ном} t)$  на интервале  $\frac{1}{4f_{ном}}; \frac{1}{4f_{ном}} + 3000T$  с шагом  $\Delta T$ ;

Согласно требованиям к качеству электроэнергии для сетей общего пользования выбирают установившееся отклонение напряжения среднее за 1 минуту, поэтому в методике рассматриваются значения напряжения на интервале длительностью  $3000 \cdot T$  (количество точек  $3000 \cdot (n+1)$ ).

3) Определение максимального и минимального значений фазного напряжения  $U_\phi^i$  в течение времени  $T + \frac{1}{6300}$  (учтена возможность увеличения периода  $T$  за счет предельно допустимого отклонения частоты от номинального значения).

Предельно допустимое установившееся отклонение напряжения составляет 10 % от номинального в соответствии с требованиями к качеству электроэнергии. Поэтому при  $\frac{|U_\phi^i - U_s^i|}{U_\phi^i} \geq 0,1$  следует пункт 5, иначе следует пункт 4.

4) Для значений фазного напряжения  $U_\phi^i = U_{\phi max}$ ,  $U_\phi^{i+1} = U_{\phi max}$  принять соответственно моменты времени  $T_i$ ,  $T_{i+1}$ . Если  $\left| \frac{1}{T_{i+1} - T_i} - f_{ном} \right| \geq 0,4$ , то поступает сигнал регулировки частоты, иначе следует пункт 1.

5) Операция детектирования режима биений заключается в следующем. При значении фазного напряжения  $U_\phi = U_{\phi max}$  принять момент времени  $t = 0$  и запоминать значения фазного напряжения через каждые  $\Delta T$  (с) до момента времени  $3000 \cdot T$  (с) – количество точек  $3000 \cdot (n+1)$ . Для  $U_\phi = U_{\phi min}$  запомнить момент времени  $T_6$ . При соответствии массивов  $U_\phi$  и  $U_{\phi max} \cos\left(\frac{\pi t}{T_6}\right)$  детектируется режим биений и выполняется пункт 6, иначе следует пункт 7.

6) Рассмотрим переход энергорайона в островной режим работы и проведем тестирование основных источников питания (ОИП). При соответствии параметров ОИП номинальным значениям выполняется подключение энергорайона к распределительной сети. При несоответствии параметров ОИП номинальным значениям выполняется отключение ОИП от соответствующей распределительной сети и включение резервного источника питания (РИП). В случае отсутствия РИП выполняется оценка запаса по мощности распределительной сети. Если эта мощность может быть увеличена до требуемого значения без потери устойчивости, то энергорайон с поврежденным ОИП подключается к распределительной сети. Если мощность распределительной сети не может быть увеличена до требуемого значения без потери устойчивости, тогда электроснабжение потребителей энергорайона с вышедшим из строя ОИП прерывается. Далее следует пункт 1.

7) Процесс регулирования напряжения, далее следует пункт 1.

Методика апробирована на имитационной модели энергорайона с

распределенными источниками энергии.

4. Предложена методика минимизации потерь мощности в энергорайоне с распределенными источниками энергии. Основная идея методики заключается в сокращении расстояния между центром электрических нагрузок группы потребителей и соответствующим ей источником питания за счет подключения потребителей к источнику питания, находящемуся на меньшем расстоянии от центра электрических нагрузок. Методика апробирована на имитационной модели промышленного энергорайона. Результаты расчетов показали, что годовая финансовая прибыль от использования методики составляет 1,5 млн. руб. Срок окупаемости оборудования, необходимого для реализации методики, составляет около 10 месяцев.

5. Рассмотрены схемно-режимные условия возникновения феррорезонансных процессов в системе электроснабжения предприятия связи:

- при использовании распределенного источника энергии в качестве дополнительного источника питания;
- при использовании распределенного источника энергии в качестве основного источника питания.

Особенности схемно-режимных условий возникновения феррорезонансных процессов в энергорайонах с распределенными источниками энергии следующие. В связи с незначительной удаленностью распределенных источников энергии от потребителей возникают дополнительные возможности для субгармонических феррорезонансных процессов. При подключении распределенного источника энергии к шинам низкого напряжения создаются условия для возникновения феррорезонансного процесса с участием обмоток низкого напряжения силовых трансформаторов.

Низкая динамическая устойчивость распределенного источника энергии на базе синхронного генератора уменьшает вероятность возникновения и продолжительность феррорезонансных процессов при обрыве фазных проводов и коротких замыканиях на линии электропередачи. Распределенные источники энергии с сетевыми инверторами имеют ограничение по выходному току и могут быть отключены устройствами защиты или технологической автоматики при возникновении аварийного режима, который, как правило, предшествует появлению феррорезонансных перенапряжений в электроустановках.

Известные в системах централизованного электроснабжения схемно-режимные условия возникновения феррорезонансных процессов в энергорайонах с распределенными источниками энергии претерпевают изменения, вызывая формирование новых феррорезонансных колебательных контуров.

6. Представлены результаты экспериментальных исследований перетоков мощности в энергорайоне с фотоэлектрической установкой. Отмечено низкое значение коэффициента мощности в точке питания нагрузки, а также наличие перетока реактивной мощности в прилегающую сеть. Приведены формулы для расчета коэффициента мощности в точке питания нагрузки при различных схемно-режимных условиях. Причины низкого значения коэффициента мощности различны и зависят от конкретных схемно-режимных условий. При одновременном питании нагрузки от аккумуляторной батареи (АКБ) через инверторный преобразователь и от сети приводит к уменьшению коэффициента мощности. Увеличению коэффициента мощности соответствует увеличение активной мощности нагрузки и увеличение реактивной выходной мощности инвертора. Заряд АКБ от фотоэлектрической установки не влияет на коэффициент мощности. При питании нагрузки от сети и заряде АКБ через инверторный преобразователь приводит к увеличению потребляемой из сети активной мощности, что приводит к увеличению коэффициента мощности. Также увеличению коэффициента мощности соответствует режим с уменьшением потребляемой инвертором из сети реактивной мощности и уменьшению реактивной мощности нагрузки. Заряд АКБ от фотоэлектрической установки способствует увеличению коэффициента мощности.

**В обсуждении доклада и прениях выступили:**

Суслов К.В. (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), Папков Б.В. (ГБОУ ВО «НГИЭУ»), Шихин В.А. (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), Илюшин П.В. (НП «НТС ЕЭС», ФГБУН «ИНЭИ РАН»).

**Суслов К.В.** – профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», д.т.н., доцент.

Обратил внимание на сущность понятия «активный потребитель».

Задал вопрос о расчете экономической эффективности внедрения методики минимизации потерь мощности в энергорайонах с распределенными источниками энергии.

Отметил, что представленный доклад демонстрирует оригинальный подход к решению поставленных задач. Для усиления практической значимости работы автору следует более детализировано проработать структуру имитационной модели.

Подчеркнул, что проблема гармонических искажений напряжения и тока является актуальной из-за увеличения числа майнинг-ферм в отдельных энергосистемах и энергорайонах.

**Папков Б.В.** – Профессор кафедры «Электрификация и автоматизация» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», д.т.н., профессор.

Задал вопрос об уровне напряжения питания блочной кустовой насосной станции в имитационной модели промышленного энергорайона.

Задал вопрос об используемом в расчетах методе определения центра электрических нагрузок группы потребителей.

Обратил внимание, что использование фотоэлектрической установки в качестве источника питания в вечернее время возможно только при наличии системы накопления электроэнергии.

**Шихин В.А.** – Заведующий научной лабораторией «Оптимизация и автоматизация энергетических и технологических систем» НИУ «МЭИ», к.т.н., доцент.

Отметил, что в представленном докладе эффективно использованы инструменты программного пакета Matlab для решения поставленных задач.

Обратил внимание на то, что в современных условиях в ведущих университетах страны возникают трудности с продлением лицензий на зарубежные программные-расчетные комплексы.

Отметил, что исследование гармонических искажений тока и напряжения в энергорайонах с жилищно-коммунальной нагрузкой является актуальным, в связи с увеличением количества подключенных к сети полупроводниковых преобразователей, в том числе, наличием генерирующих установок инверторного включения.

**Илюшин П.В.** – Председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н.

Обратил внимание, что наличие компенсирующих устройств в имитационной модели энергорайона с коммунально-бытовой нагрузкой уменьшает ее практическую значимость и достоверность расчетов. Компенсирующие устройства применяют только в энергорайонах с большой долей двигательной нагрузки.

Отметил, что согласно результатам имитационного моделирования любое короткое замыкание в сети энергорайона приводит к выпаданию генераторов из синхронизма с полным нарушением электроснабжения потребителей.

Обратил внимание, что в блоке точной синхронизации имитационной модели задана большая допустимая величина погрешности изменения фазы напряжения (10 %). Такая величина погрешности содействует росту величины



ударного момента на вал синхронного генератора при синхронизации, что приведет к его отключению технологическими защитами, особенно, если речь идет о генерирующей установке зарубежного производства.

Отметил, что значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока (около 21 %) для энергорайона с коммунально-бытовой нагрузкой представляется завышенным и требует пояснений.

Отметил, что в методике минимизации потерь мощности следует добавить блок оптимизации для выполнения оценки технологических и экономических показателей перед выполнением операций по перераспределению источников питания для электроснабжения отдельных групп потребителей. Предложенная методика представляется эффективной, если будет реализована в энергорайоне с одним собственником генерирующего оборудования и электроприемников или в энергорайоне с внедренной автоматической системой взаиморасчетов между всеми участниками внутри рассматриваемого энергорайона.

Обратил внимание, что следует пересмотреть структуру генерации в рассматриваемом энергорайоне, используемом для апробации предложенной методики минимизации потерь мощности: маловероятно существование дачного поселка с фотоэлектрической установкой, имеющей суммарную установленную мощность 6 МВт; использование фотоэлектрической установки в вечернее время требует наличия в ее составе системы накопления электроэнергии, что приведет к существенному повышению стоимости электроэнергии в энергорайоне.

Отметил, что на схемах системы электроснабжения предприятия связи не обозначена нагрузка на одной из секций шин 0,4 кВ.

Обратил внимание, что коэффициент мощности в точке подключения инвертора фотоэлектрической установки к нагрузке имеет низкое значение. Это может быть связано с конструктивными особенностями экспериментального стенда, но в реальных условиях характер нагрузки будет другой.

Заслушав выступления экспертов по результатам дискуссии совместное заседание Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **отмечает:**

1. Актуальность и практическую значимость представленных в докладе результатов исследований, при учете высказанных экспертами в процессе обсуждения замечаний и предложений.

2. Целесообразность оценки гармонических искажений токов и напряжений в энергорайонах с распределенными источниками энергии методами имитационного моделирования.



3. Перспективность применения методики минимизации потерь мощности в энергорайонах с распределенными источниками энергии, с учетом ограничений технического, экономического и институционального характера.

4. Перспективность исследования условий возникновения феррорезонансных процессов в энергорайонах с распределенными источниками энергии, при условии наличия указанных проблем в реальных энергорайонах.

Совместное заседание Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **решило:**

1. Рекомендовать автору продолжить исследования в области имитационного моделирования и разработки методик управления изолированными или находящимися в островном режиме работы энергорайонов с распределенными источниками энергии.

2. Рекомендовать автору добавить в методике минимизации потерь мощности блок оптимизации, который будет выполнять оценку технологических и экономических показателей перед выполнением операций по перераспределению источников питания для электроснабжения отдельных групп потребителей.

3. Рекомендовать автору пересмотреть структуру генерации в рассматриваемом энергорайоне, используемом для апробации предложенной методики минимизации потерь мощности.

4. Рекомендовать автору в блоке точной синхронизации при имитационном моделировании уменьшить допустимую величину погрешности изменения фазы напряжения при синхронизации энергорайона с энергосистемой.

5. Рекомендовать автору продолжить исследования феррорезонансных процессов в энергорайонах с распределенными источниками энергии, при условии наличия указанных проблем в реальных энергорайонах.

С заключительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. Илюшин П.В., в котором отметил, что развитие распределенных источников энергии в краткосрочной и долгосрочной перспективе будет продолжаться нарастающими темпами. Эффективное использование местных энергоресурсов, включая вторичные энергоресурсы, позволяет обеспечить доступность, надежность и эффективность энергоснабжения потребителей. Опережающее развитие новых территорий

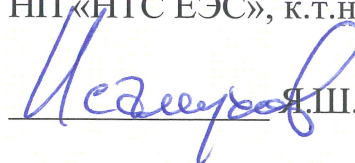
возможно только при решении вопросов энергоснабжения потребителей, которые эффективно решаются в срок от 9 до 12 месяцев за счет ввода распределенных источников энергии, в том числе на основе ВИЭ. Рассмотренные на заседании результаты исследований позволяют решать отдельные проблемные вопросы, возникающие в энергорайонах с распределенными источниками энергии, имеющие в своем составе как промышленную, так и коммунально-бытовую нагрузку. Перспективы новых исследований в рассмотренной научной области имеются, поэтому работу следует продолжать, внедряя полученные результаты в реальных энергорайонах с распределенными источниками энергии.

Первый заместитель Председателя  
Научно-технической коллегии  
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор



В.В. Молодюк

Ученый секретарь  
Научно-технической коллегии  
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.



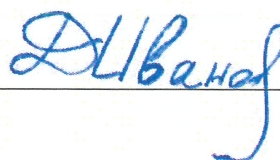
Я.И. Исамухамедов

Председатель секции «АСРЭ и РЭР»  
НП «НТС ЕЭС», ученый секретарь  
Секции по проблемам НТП в энергетике  
Научного совета РАН по системным  
исследованиям в энергетике, д.т.н.



П.В. Илюшин

Ученый секретарь секции  
«Активные системы распределения  
электроэнергии и распределенные  
энергетические ресурсы» НП «НТС  
ЕЭС»



Д.А. Ивановский