

УДК 622.311

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ И ВЫБОР РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫХ СУТОК ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРИМЕНЕНИЯ СНЭЭ В СЕТЯХ 0,4 кВ

Толокнова Е. Е., студент гр. ЭРб-231, III курс
Научный руководитель: Паскарь И. Н., старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени
Т. Ф. Горбачева»
г. Кемерово

Одним из ключевых показателей качества электрической энергии является уровень напряжения, отклонение которого от нормативных значений приводит к снижению надежности электроснабжения, ухудшению условий работы электроприемников и сокращению срока службы оборудования. Для сетей общего назначения требования к допустимым отклонениям напряжения устанавливаются ГОСТ 32144-2013 [1].

Проблема особенно характерна для распределительных сетей 0,4 кВ с радиальной структурой и протяженными линиями, где в конце фидеров падение напряжения становится сопоставимым с допустимым эксплуатационным запасом. Анализ причин неудовлетворительного качества напряжения в низковольтных сетях и жалоб потребителей подробно рассматривается в работах [2, 3]. В качестве одного из перспективных способов повышения качества напряжения рассматривается применение систем накопления электрической энергии (СНЭЭ) на трансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ [4, 5].

На практике состояние сети нередко оценивается по единичному критерию, например по минимальному значению напряжения в одном узле. Такой подход удобен, однако не позволяет учитывать длительность нарушений и их распределение по времени и по участкам сети. Поэтому для последующего анализа возможностей применения СНЭЭ требуется более содержательная система показателей.

Цель статьи состоит в разработке и обосновании системы показателей качества напряжения и подхода к выбору репрезентативных суток для оценки режимов сети 0,4 кВ в задачах последующего применения СНЭЭ.

При оценке напряжения в сетях низкого напряжения нормативные требования необходимо переводить в форму, удобную для дискретного расчета. Пусть для каждого узла сети i и каждого момента времени t известно значение напряжения $U_i(t)$. Для дальнейшего анализа используется относительное напряжение, определяемое следующим выражением:

$$U_i^t = U_i(t) / U_{\text{ном}}$$

Для фиксации факта нарушения вводится бинарный признак $I_i(t)$, принимающий значение 1 при выходе напряжения за допустимые пределы

$U_{\min, \text{dop}}$ и $U_{\max, \text{dop}}$ и 0 в противном случае. Доля часов с нарушением напряжения определяется по формуле:

$$K_{\text{viol}, i} = \frac{1}{T} \cdot \sum_{t=1}^T I_i(t)$$

Для оценки тяжести режима дополнительно используются показатели глубины отклонения от нижней и верхней допустимых границ:

$$\Delta U_i^{-t} = \max(0, U_{\min, \text{dop}} - U_i^t)$$

$$\Delta U_i^{+t} = \max(0, U_i^t - U_{\max, \text{dop}})$$

Суммарная глубина нарушений в узле и интегральный показатель по сети определяются выражениями:

$$K_{\text{depth}, i} = \sum_t \Delta U_i^{-t} + \Delta U_i^{+t}$$

$$K_{\text{net}} = \sum_{i=1}^N W_i \cdot K_{\text{depth}, i}$$

Предлагаемый набор показателей эффективности (КРІ) позволяет оценивать не только сам факт выхода напряжения за допустимые пределы, но и частоту, тяжесть и пространственное распределение нарушений. Сводная характеристика используемых показателей приведена в табл. 1.

Таблица 1

Предлагаемые КРІ для оценки отклонений напряжения

Показатель	Обозначение	Способ определения	Практический смысл
Доля часов нарушений в узле	$K_{\text{viol}, i}$	$K_{\text{viol}, i} = \frac{1}{T} \cdot \sum_t I_i(t)$	Характеризует частоту нарушений напряжения в узле
Максимальная длина отклонения	$\max_t \Delta U_{i(t)} $	Максимум $ \Delta U_{i(t)} $ по времени	Показывает тяжесть наихудшего режима
Суммарная глубина отклонений	$K_{\text{depth}, i}$	$K_{\text{depth}, i} = \sum \Delta U_i^{-t} + \Delta U_i^{+t}$	Учитывает одновременно глубину и длительность нарушений
Минимальное напряжение узла	$U_{\min, i}$	Минимум ΔU_i^t по времени	Характеризует наиболее неблагоприятное состояние узла
Минимальное напряжение по сети	$U_{\min, \text{net}}$	Минимум по всем узлам и времени	Позволяет выявить наиболее проблемный узел сети
Интегральный показатель по сети	K_{net}	$\sum W_i \cdot K_{\text{depth}, i}$ по всем узлам	Дает агрегированную оценку состояния сети в целом

Здесь T – число временных интервалов наблюдения; ΔU_i^{-t} и ΔU_i^{+t} – отклонения напряжения от нижней и верхней допустимых границ соответственно; W_i – весовой коэффициент узла. При отсутствии оснований для дифференциации на первом этапе допускается принимать $W_i = 1$.

Для демонстрации информативности предложенных показателей рассмотрен упрощенный пример для трех условных узлов сети на интервале наблюдения $T = 4$ часа. Номинальное напряжение принято равным $U_{ном} = 220$ В, а допустимый диапазон относительного напряжения – от 0,95 до 1,05. По исходным значениям напряжения были рассчитаны относительные напряжения, доля часов с нарушениями, суммарная глубина отклонений и минимальное напряжение в узле. Итоговые значения сведены в табл. 2.

Таблица 2

Итоговые KPI по демонстрационному примеру

Узел	$U_{min,i}$	Число часов с нарушением	$K_{viol,i}$	$K_{depth,i}$
Узел 1	0,886	2 из 4	0,50	0,105
Узел 2	0,955	1 из 4	0,25	0,018
Узел 3	0,991	1 из 4	0,25	0,041

При равных весовых коэффициентах интегральный показатель по сети определяется следующим образом:

$$K_{net} = 0,105 + 0,018 + 0,041 = 0,164$$

Полученные результаты показывают, что ориентация только на минимальное напряжение недостаточна для корректной диагностики состояния сети. Так, узлы 2 и 3 имеют одинаковую долю часов с нарушениями, однако суммарная глубина отклонений у узла 3 выше, чем у узла 2. Узел 1 является наиболее проблемным одновременно по длительности и по тяжести нарушений. Следовательно, предложенный набор KPI позволяет учитывать не только факт выхода напряжения за допустимые пределы, но и интенсивность неблагоприятного режима.

При переходе к дискретному анализу режимов необходимо определить временной шаг расчета. Слишком крупный шаг сглаживает пики нагрузки и может скрывать интервалы фактического нарушения напряжения, а слишком мелкий шаг резко увеличивает объем исходных данных и вычислительную трудоемкость. В настоящей работе в качестве контрольного принимается шаг 1 час, что обеспечивает разумный компромисс между информативностью, доступностью исходных данных и сложностью расчета.

Для предварительной оценки отклонений напряжения использование полного годового горизонта расчета часто оказывается избыточным. Поэтому в работе применяется подход на основе репрезентативных суток, позволяющий заменить большое число режимов ограниченным набором характерных дней без существенной потери информации о критических состояниях сети. Выбор таких суток выполняется по данным почасовых профилей потребителей.

В анализ включаются зимние сутки с выраженным максимумом нагрузки, летние сутки с типовым суточным графиком, а также неблагоприятные сутки, характеризующиеся наибольшей выраженностью нарушений напряжения. Для удобства последующего анализа каждому типу суток присваивается

краткое кодовое обозначение. Неблагоприятные сутки определяются не только по максимуму нагрузки, но и по показателям качества напряжения, в том числе по минимальному значению напряжения и числу часов нарушений. Пример набора репрезентативных суток приведен в табл. 3.

Таблица 3

Пример набора репрезентативных суток

Тип суток	Код суток	Характер режима	Критерий выбора	Использование в расчете
Зимние сутки	ЗС-1	Выраженный максимум нагрузки	Зимний режим с характерным вечерним пиком нагрузки	Базовый зимний сценарий
Летние сутки	ЛС-1	Иной профиль потребления	Типовой летний график с более ровной или смещенной нагрузкой	Базовый летний сценарий
Неблагоприятные сутки	НС-1	Максимальная выраженность нарушений напряжения	Наибольшее число часов нарушений и(или) минимальное значение напряжения	Критический сценарий

В результате выполненного исследования сформирован подход к оценке отклонений напряжения в сетях 0,4 кВ, основанный на использовании системы КРІ и ограниченного набора репрезентативных суток. Показано, что анализ состояния сети только по минимальному напряжению является недостаточным, поскольку не отражает длительность нарушений и их пространственное распределение.

Предложенный набор показателей, включающий долю часов нарушений, глубину отклонений, характеристики худших узлов и интегральный показатель по сети, обеспечивает более полную инженерную интерпретацию режима. На демонстрационном примере подтверждено, что совместное использование этих показателей позволяет различать режимы, которые при анализе только по минимальному напряжению выглядели бы близкими.

Показано, что применение часового шага расчета и использование 2-3 репрезентативных суток являются достаточными для предварительной инженерной оценки качества напряжения в сети 0,4 кВ. Полученные результаты могут служить методической основой для дальнейших исследований, направленных на ранжирование трансформаторных подстанций и выбор параметров СНЭЭ.

Список литературы:

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Бирюлин В. И., Куделина Д. В., Брежнев И. В. Исследование проблем качества электроэнергии в сетях напряжением 0,4 кВ // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 1(53). С. 109-121.
3. Бородин М. В., Виноградов А. В., Голиков И. О., Лансберг А. А. Анализ показателей качества электроэнергии в распределительных электрических сетях 0,4 кВ и причин жалоб потребителей в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» // Научный журнал молодых ученых. 2022. № 3(28). С. 72-80. EDN: WRWOSY.
4. Гусев Ю. П., Субботин П. В. Разработка усовершенствованной методики выбора параметров и мест размещения систем накопления электроэнергии в распределительных электрических сетях // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19, № 2. С. 48-61.
5. Владимиров Л. В. Накопители электрической энергии в системах децентрализованного электроснабжения // Вестник Югорского государственного университета. 2024. Т. 20, № 4. С. 31-35.