

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ

А. Ф. Пащенко, А. А. Цветков

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,

✉ a.paschenko@ipu.ru, ✉ tsvetkov-a@ipu.ru

**Аннотация.** Рассматривается задача оценки и прогнозирования качества трехфазных сетей электроснабжения путем введения интегрального критерия, сформированного на основе прикладных и фундаментальных исследований в области управления современными энергосистемами, проведенных в Центре интеллектуальной цифровой электроэнергетики Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. Суммарный критерий оценки разработан для таких показателей, как отклонение частоты, медленные изменения напряжения (в каждой из фаз), суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (в каждой из фаз). Представлены практические результаты применения предложенного критерия на основе данных, собранных в реальной сети электроснабжения начиная с 2021 г. Разработанный критерий расширяет возможности оценки качества электрических сетей в сравнении с показателями, принятыми в отрасли.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии, интегральный критерий оценки, управление энергосистемой, прогнозное моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Любая современная организация является потребителем электроэнергии (ПЭ), так как использует освещение, вычислительную технику, системы поддержания микроклимата, бытовые приборы и т. п. Каждый из ПЭ, в свою очередь, предъявляет определенные требования к качеству используемой электроэнергии (допустимые отклонения напряжения и частоты переменного напряжения, допустимые гармонические составляющие и т. п.), от качества которой зависит надежность эксплуатируемой техники и эффективность ее работы. Поэтому среди собираемых данных ключевое значение имеют данные о параметрах сети электроснабжения (СЭ), на основе которых можно получить ретроспективную информацию о работе сети электроснабжения, а также построить модель поведения этой сети. Наиболее перспективным направлением исследований является возможность создания моделей прогнозирования будущего со-

стояния энергетической системы на основе текущего состояния и исторических данных, которые позволили бы перейти к управлению всей системой на основе прогнозных данных, заранее предсказывать и предотвращать аварийные или нештатные ситуации.

Важно отметить, что энергосбытовые и энергоснабжающие компании при оценке качества энергоснабжения ориентируются в основном на индексы надежности IEEE (Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике). К ним, в частности, относятся:

- SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) – индекс средней частоты отключений по системе, который определяется отношением общего числа отключенных потребителей электроэнергии, потерявших питание от длительных внеплановых нарушений электроснабжения, к общему числу подключенных потребителей электроэнергии за рассматриваемый отчетный период времени; согласно международному стандарту 1366 IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability



Indices [2], для расчета индекса используется уравнение

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{N_t},$$

где  $i$  – число перерывов,  $i = \overline{1, n}$ ;  $N_i$  – число потребителей в системе, где был перерыв в электропитании;  $N_t$  – общее количество потребителей в системе.

• SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) – индекс средней продолжительности отключений по системе, который определяется отношением общей продолжительности длительных внеплановых нарушений электроснабжения потребителей к общему числу подключенных потребителей за рассматриваемый отчетный период времени и рассчитывается как

$$SAIDI = \frac{\sum_i U_i N_i}{N_T}$$

где  $N_i$  – количество клиентов;  $U_i$  – годовое время простоя для локации  $i$ ; а  $N_T$  – общее количество обслуживаемых клиентов.

В российской энергетике показатель надежности (индекс) обозначается как  $\Pi_{saifi}$ , его расчет производится с 2016 г. согласно методике расчета по приказу Министерства энергетики № 1256 [3]. Но указанная в приказе методика рассматривает либо факты прекращения (возобновления) подачи энергии, либо дифференцируется по уровням напряжения, не учитывая такие показатели, как, например, частота сети и гармонические составляющие.

В ряде зарубежных работ была сделана попытка разработки универсального критерия для оценки качества СЭ. Например, в работе [4] предлагается комплексный (многофакторный) метод оценки с использованием многокритериального подхода на основе метода VIKOR. Этот метод позволяет получить комплексную оценку для каждого узла сети, учитывая систему показателей: отклонение напряжения, гармоники, несимметрию напряжения, колебания напряжения и фликер, провалы напряжения и отклонение частоты. Особенность подхода заключается в комбинации весов, которые рассчитываются улучшенным методом, сочетающим анализ серых связей и метод аналитических связей, что позволяет учесть взаимозависимость

показателей и мнения экспертов. Финальный критерий оценки КЭ всей сети ( $F$ ) рассчитывается как сумма произведений

$$F = \sum_j (Q_j D_j),$$

где  $Q_j$  – оценка качества электроэнергии узла  $j$ , полученная методом VIKOR;  $D_j$  – степень влияния узла  $j$  на всю сеть, рассчитанная на основе теории сложных сетей. Однако предложенный критерий направлен в первую очередь не на то, чтобы указать, что в каком-то узле плохое напряжение, а количественно измерить, как состояние этого узла ухудшает качество электроэнергии во всей распределительной сети в целом.

В работе [5] предлагается критерий классификации (распознавания) составных возмущений (отклонений от нормального режима) качества электроэнергии. В отличие от статьи [4], где целью была комплексная оценка уровня качества, здесь задача заключается в идентификации типа нарушения. Основной предлагаемый критерий можно сформулировать как «точность распознавания типа составного возмущения с использованием преобразования одномерного сигнала в двумерное изображение».

Авторы работы [6] применяют подход, схожий с предложенным в статье [4], но для конкретного объекта. В данной работе используется объективное взвешивание показателей без учета мнения экспертов. Здесь применяется рейтинг временных интервалов: для каждого момента времени вычисляется единый компромиссный индекс, позволяющий утверждать, к примеру, что: «срез номер 3 был лучше, чем срез номер 5». При этом предлагаемый метод определяет комбинации факторов, которые дублируют информацию (например, два параметра растут одновременно и одинаково), и распределяет веса так, чтобы не учитывать одно и то же дважды.

Однако подходы, предложенные авторами приведенных исследований, не нашли широкого практического применения.

Попытка стандартизировать подходы к оценке качества СЭ сделана в ГОСТ 32144–2013 [7], однако в этом документе представлены разрозненные показатели качества электроэнергии (КЭ), которые не позволяют комплексно оценивать качество СЭ в заданный момент времени, а также сравнивать СЭ между собой.

При этом изменение пиковых нагрузок, вызванных климатическими факторами (зима/лето), появление новых категорий потребителей, в том числе энергоемких центров обработки данных большой мощности, увеличение доли электро- и гибридного транспорта, переход на электроотопление в связи с износом тепловых сетей и поддержанием экологической повестки в неблагоприятных регионах, развитие энергоемких центров обработки данных цифровой экономики, изменение балансов между активной и реактивной нагрузками и др. факторы приводят к нестабильности частоты и напряжения в сети, увеличению потерь электроэнергии в сетях, снижению срока службы электрических сетей, особенно кабельных линий. Изменение требований потребителей I и II категорий надежности к уровню качества электроэнергии, появление новой группы потребителей – высокотехнологичных производств, предъявляющих повышенные требования к качеству электроснабжения, – все эти факторы требуют более комплексного подхода к оценке качества поставляемой потребителям электроэнергии и введения новых характеристик, позволяющих оценивать качество СЭ в реальном времени.

В Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) функционирует Центр интеллектуальной цифровой энергетики (далее – Центр), который, в частности, занимается разработкой и исследованием методов и технологий интеллектуального управления электроэнергетическими системами. Ключевая задача Центра – создание и совершенствование программно-аппаратной инфраструктуры для сбора данных, разработка алгоритмов и математических моделей для систем управления энергопотреблением и микроклиматом в помещениях.

Начиная с 2021 г. Центр организовал сбор и систематизацию следующих данных (в скобках указаны датчики, служащие источниками соответствующих данных):

- параметры сети электроснабжения (счетчики «Меркурий-234», установленные на питающие трехфазные кабели, приходящие от трансформаторных подстанций);
- характеристики микроклимата в помещениях ИПУ РАН (комплексные мультисенсоры, собирающие информацию о температуре, влажности, освещенности и концентрации углекислого газа

в помещениях);

- метеорологические показатели (локальная метеостанция, собирающая информацию о погодных условиях).

Подробно архитектура системы сбора данных представлена в работе [1] (рис. 1).

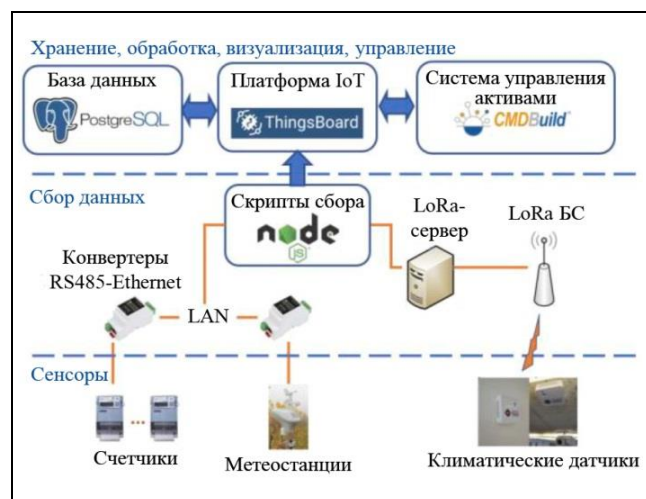


Рис. 1. Архитектура системы сбора данных, разработанная в Центре интеллектуальной цифровой энергетики

В настоящей статье предлагается разработанный интегральный критерий для оценки и прогнозирования качества СЭ, а также для сравнения различных СЭ между собой на основе данных, собираемых системами, имеющими архитектуру, функционально аналогичную описанной в [1].

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Согласно ГОСТ 32144–2013, к показателям КЭ относят:

- отклонение частоты,
- отклонения напряжения электропитания,
- колебания напряжения электропитания,
- несинусоидальность напряжения,
- несимметрию напряжений,
- прерывания напряжения,
- провалы напряжения и перенапряжения,
- импульсные напряжения.

Система сбора данных, архитектура которой показана на рис. 1, собирает и хранит в базе данных (БД) информацию о параметрах СЭ в виде таблицы так, как показано на рис. 2. Соответствие показателей КЭ атрибутам сущности *Electricity\_sensor\_readings* приведено в табл. 1.

| public.electricity_sensor_readings                                                  |               |                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------|
|    | id            | int8                         |
|    | device_listid | int8                         |
|    | roomid        | int8                         |
|    | sensor_name   | varchar(100)                 |
|    | ts            | timestamp(35) with time zone |
|    | i1            | numeric(9, 3)                |
|    | i2            | numeric(9, 3)                |
|    | i3            | numeric(9, 3)                |
|    | p1            | numeric(10, 0)               |
|    | p2            | numeric(10, 0)               |
|    | p3            | numeric(10, 0)               |
|    | pt            | numeric(10, 0)               |
|    | q1            | numeric(10, 0)               |
|    | q2            | numeric(10, 0)               |
|    | q3            | numeric(10, 0)               |
|    | qt            | numeric(10, 0)               |
|   | s1            | numeric(10, 0)               |
|  | s2            | numeric(10, 0)               |
|  | s3            | numeric(10, 0)               |
|  | st            | numeric(10, 0)               |
|  | t             | numeric(5, 2)                |
|  | u1            | numeric(5, 2)                |
|  | u2            | numeric(5, 2)                |
|  | u3            | numeric(5, 2)                |
|  | alpha1        | numeric(5, 2)                |
|  | alpha2        | numeric(5, 2)                |
|  | alpha3        | numeric(5, 2)                |
|  | frequency     | numeric(4, 2)                |
|  | harmonic1     | numeric(3, 2)                |
|  | harmonic2     | numeric(3, 2)                |
|  | harmonic3     | numeric(3, 2)                |
|  | phi1          | numeric(4, 3)                |
|  | phi2          | numeric(4, 3)                |
|  | phi3          | numeric(4, 3)                |
|  | phit          | numeric(4, 3)                |
|  | mark          | varchar(30)                  |

Рис. 2. Таблица БД «Показания датчика электричества»  
(Electricity\_sensor\_readings)

При формировании суммарного критерия качества СЭ были исключены следующие показатели КЭ:

- колебания напряжения электропитания, так как эти колебания связаны с наличием гармоник в питающем напряжении и учитываются в суммарном коэффициенте гармонических составляющих напряжения;

- несимметрия напряжений, так как этот показатель формируется, согласно требованиям ГОСТ 32144–2013, в течение достаточно длительного

времени (одна неделя) и не позволяет оперативно оценивать КЭ;

- прерывания напряжения, провалы напряжения и перенапряжения, импульсные напряжения, так как эти критерии связаны с быстрыми и случайными событиями в сети которые в рамках созданной архитектуры сбора данных по параметрам СЭ, построенной на основе стандартных аппаратных средств, практически невозможно отследить.

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА СЭ

В качестве исходного подхода к формированию интегрального критерия качества (далее – ИКК) СЭ было принято, что для трехфазных СЭ наиболее значимыми параметрами являются флуктуации частоты, напряжения в фазах и суммарные коэффициенты гармонических составляющих в фазах. Исходя из этого, было принято следующее представление ИКК:

$$K_{\Sigma 3} = F(\Delta f_{ENet}(t), \delta U_1(t), \delta U_2(t), \delta U_3(t), K1_{THD}(t), K2_{THD}(t), K3_{THD}(t)), \quad (1)$$

где  $K_{\Sigma 3}$  – интегральный критерий качества сетей ЭС, функционально зависящий от некоторого кортежа:

$\Delta f_{ENet}(t) = frequency - f_{ном}$  – отклонение частоты сети в виде функции от времени;

$\delta U_1(t) = |(U_1 - U_0) / U_0|$  – отклонение напряжения между нулевым проводом и первой фазой в виде функции от времени;

$\delta U_2(t) = |(U_2 - U_0) / U_0|$  – отклонение напряжения между нулевым проводом и второй фазой в виде функции от времени;

$\delta U_3(t) = |(U_3 - U_0) / U_0|$  – отклонение напряжения между нулевым проводом и третьей фазой в виде функции от времени;

$K1_{THD}(t)$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений в первой фазе в виде функции от времени;

$K2_{THD}(t)$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений во второй фазе в виде функции от времени;

$K3_{THD}(t)$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений в третьей фазе в виде функции от времени.

Таблица 1

**Соответствие атрибутов таблицы БД Electricity\_sensor\_readings показателям КЭ**

| Наименование атрибута | Описание атрибута                                                                              | Связь с показателем КЭ (ГОСТ 32144–2013)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ts                    | Время измерения, включая дату, время и временную зону                                          | Не применимо                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| $U_1$                 | Напряжение между нулевым проводом и первой фазой, измеренное в некоторый момент времени ts, В  | Отклонение напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального (согласованного) значения, %. Определяется как<br>$\begin{cases} \delta U_{(-)} = [(U_0 - U_i)/U_0] \cdot 100, U_i < U_0, \\ \delta U_{(+)} = [(U_i - U_0)/U_0] \cdot 100, U_i > U_0, \end{cases}$ где $U_0$ – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению, определяемому в ГОСТ 32144–2013 равным 230 В; $U_i$ – напряжение в $i$ -й фазе |
| $U_2$                 | Напряжение между нулевым проводом и второй фазой, измеренное в некоторый момент времени ts, В  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| $U_3$                 | Напряжение между нулевым проводом и третьей фазой, измеренное в некоторый момент времени ts, В |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| frequency             | Частота сети, измеренная в некоторый момент времени ts, Гц                                     | Отклонение частоты, Гц. Определяется как $\Delta f = frequency - f_{ном}$ , где $f_{ном}$ – номинальное значение частоты напряжения электропитания, определяемое в ГОСТ 32144–2013 равным 50 Гц                                                                                                                                                                                                                                                    |
| harmonic 1            | Коэффициент гармоник первой фазы, безразмерная величина                                        | Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_U$ , %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| harmonic 2            | Коэффициент гармоник второй фазы, безразмерная величина                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| harmonic 3            | Коэффициент гармоник третьей фазы, безразмерная величина                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

Для фиксированного времени  $t$  можно представить кортеж из выражения (1) как семимерный вектор (тензор первого ранга), а в качестве  $K_{\Sigma 3}$  использовать его модуль (норма Фробениуса или  $L_2$ -норма (см. например, [8]):

$$K_{\Sigma 3} = \left( (\alpha_1 \Delta f_{ENet})^2 + (\alpha_2 \delta U_1)^2 + (\alpha_2 \delta U_2)^2 + (\alpha_2 \delta U_3)^2 + (\alpha_3 K1_{THD})^2 + (\alpha_3 K2_{THD})^2 + (\alpha_3 K3_{THD})^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $\alpha_1 = 2,5 \text{ Гц}^{-1}$  – нормирующий коэффициент для отклонения частоты сети;  $\alpha_2 = 4,7619 \text{ В}^{-1}$  – нормирующий коэффициент для отклонения напряжения;  $\alpha_3 = 10$  – нормирующий коэффициент для суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжений.

Значения нормирующих коэффициентов определялись методом наименьших квадратов таким образом, чтобы при максимально допустимых значениях параметров СЭ значение ИКК было в интервале между 0 и 2.

**3. ИССЛЕДОВАНИЕ ИКК**

Учитывая тот факт, что траекторию семимерного вектора, которым является  $K_{\Sigma 3}$ , представить в трехмерном пространстве невозможно, было принято решение исследовать трехмерные следы  $K_{\Sigma 3}$  в системе координат  $K_{\Sigma 3} = f(U_1, U_2)$  при фиксировании остальных компонент вектора. Некоторые результаты представлены ниже (рис. 3–7).

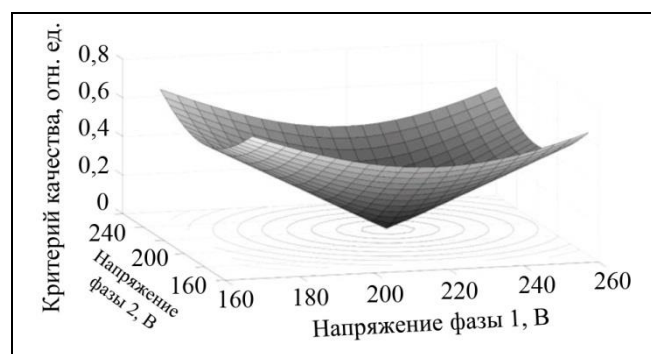
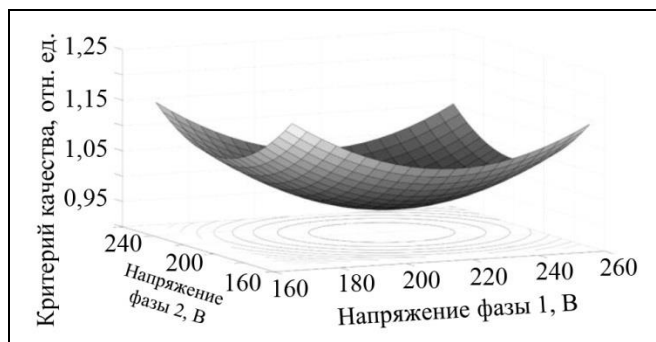
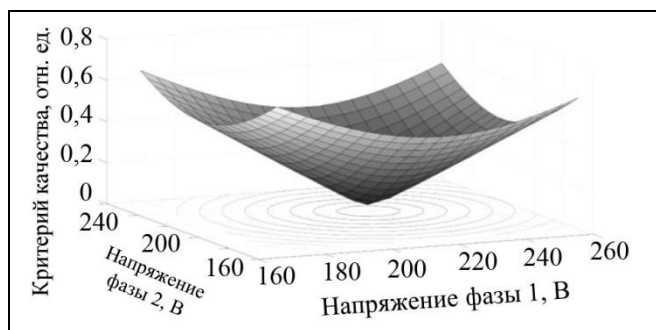


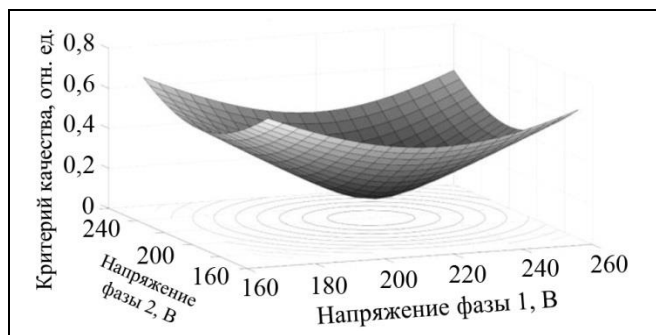
Рис. 3. 3D-след ИКК для трехфазной сети при фиксированных значениях: напряжение фазы 3 – 220 В; частота – 50 Гц; суммарные коэффициенты гармонических составляющих в каждой из фаз на уровне номинальных значений



**Рис. 4. 3D-след ИКК для трехфазной сети при фиксированных значениях:** напряжение фазы 3 – 220 В; суммарные коэффициенты гармонических составляющих в фазах 1 и 3 на уровне номинальных значений; частота – 49,2 Гц (пороговое минимальное значение); суммарный коэффициент гармонических составляющих в фазе 2 задан равным 0,3 (аварийное значение)



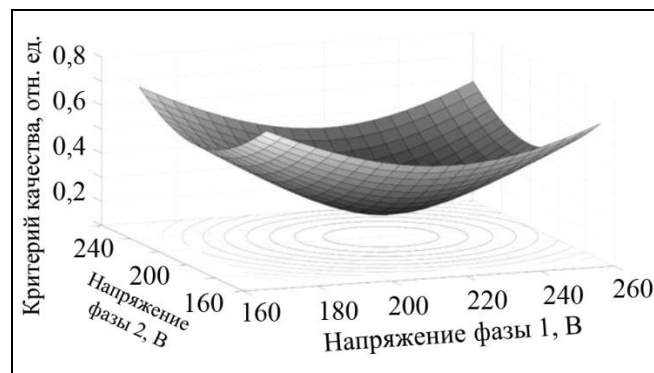
**Рис. 5. 3D-след ИКК для трехфазной сети при фиксированных значениях:** напряжение фазы 3 – 220 В; суммарные коэффициенты гармонических составляющих в фазах 1 и 3 на уровне номинальных значений; частота – 50 Гц (номинальное значение), суммарный коэффициент гармонических составляющих в фазе 2 задан на уровне 0,01 (допустимое значение)



**Рис. 6. 3D-след ИКК для трехфазной сети при фиксированных значениях:** напряжение фазы 3 – 230 В (допустимое значение); частота – 50 Гц; суммарные коэффициенты гармонических составляющих в каждой из фаз на уровне номинальных значений

Как видно из рисунков, если параметры сети стремятся к номинальным значениям, то для ИКК экстремум стремится к нулю (рис. 3).

Результаты исследования выражения для ИКК (2) на характерные точки (минимальные значения ИКК) представлены в табл. 2.



**Рис. 7. 3D-след ИКК для трехфазной сети при фиксированных значениях:** напряжение фазы 3 – 240 В (максимальное допустимое значение); частота – 50 Гц; суммарные коэффициенты гармонических составляющих в каждой из фаз на уровне номинальных значений

Как видно из результатов анализа, для СЭ, которая в некоторый момент времени соответствует требованиям ГОСТ 32144—2013, т. е. частота равна 50 Гц, напряжение в каждой из фаз равно 220 В, нелинейные искажения в каждой из фаз равны нулю, ИКК будет иметь предельное значение нуль (см. рис. 3).

#### 4. ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА СЭ

Подходы, изложенные в § 1 и 2), применялись для оценки качества СЭ следующим образом:

1. Использовалась система сбора информации о параметрах КЭ, описанная выше (см. рис. 1);

2. Система сбора информации, содержащая в БД таблицу, включающую информацию о состоянии СЭ, как показано выше (см. рис. 2), была дополнена представлением (view), которое содержало следующие атрибуты, пополняемые из данной таблицы:

- ссылки на конкретный датчик, с которого снимается информация;
- время сбора информации;
- частота сети;
- напряжение в первой фазе;
- напряжение во второй фазе;
- напряжение в третьей фазе;
- суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений в первой фазе;
- суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений во второй фазе;
- суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений в третьей фазе;
- ИКК (вычисляемый атрибут) – рассчитывается по формуле (2).

3. Показатель ИКК в виде функции от времени визуализировался, например, как показано ниже (рис. 8).

Таблица 2

### Характерные точки для состояний сети СЭ

| Состояние СЭ                                  | Характерные точки $K_{\Sigma 3}$ |          | Комментарий                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------|----------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                               | min                              | max      |                                                                                                                                                                                                   |
| Нормальное состояние                          | 0                                | 0,218218 | Все параметры КЭ не превышают допустимых значений как в сторону низких значений, так и в сторону высоких значений                                                                                 |
| Предельно низкие значения для параметров СЭ   | 0,218218                         | 0,626783 | Параметры КЭ снизились ниже допустимых значений, но не достигли критически низких значений, т. е. эксплуатация СЭ еще допустима, но требуются дополнительные действия по устранению недостатков   |
| Предельно высокие значения для параметров СЭ  | 0,218218                         | 1,520808 | Параметры КЭ повысились выше допустимых значений, но не достигли критически высоких значений, т. е. эксплуатация СЭ еще допустима, но требуются дополнительные действия по устранению недостатков |
| Критически низкие значения для параметров СЭ  | 0,474386                         | 1,294267 | Параметры КЭ снизились ниже предельных значений, т. е. эксплуатация СЭ запрещена и требуются дополнительные действия по устранению недостатков                                                    |
| Критически высокие значения для параметров СЭ | 0,308607                         | 2,035401 | Параметры КЭ повысились выше предельных значений, т. е. эксплуатация СЭ запрещена и требуются дополнительные действия по устранению недостатков                                                   |

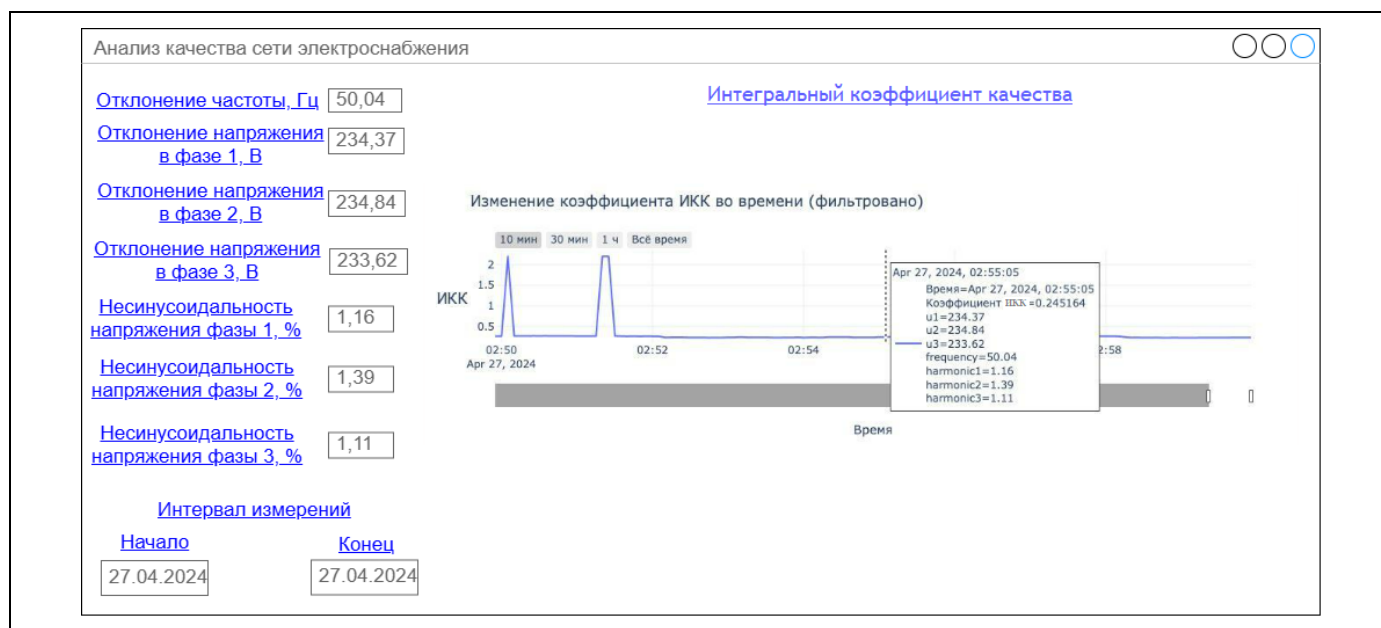


Рис. 8. Пример визуализации изменения ИКК во времени

Кроме того, на данной экранной форме для каждой из точек графика отображались соответствующие ей параметры сети, что позволяло, в случае выхода ИКК за пределы допустимых значений, оценить, какой именно из параметров не соответствует требованиям ГОСТ 32144–2013.

Экранная форма, показанная выше (см. рис. 8), позволяет виртуально менять для каждой из точек графика ИКК ее значения, что, в свою очередь, позволяет увидеть, как изменение параметра (или

параметров) изменит значение ИКК (измененное состояние не сохранялось в БД). Данная функция дает возможность моделировать различные состояния СЭ и рассматривать разнообразные сценарии.

Такой подход позволяет прогнозировать КЭ при изменении параметров СЭ и, как следствие, вырабатывать рекомендации по улучшению КЭ, реализовывать своевременные управляющие воздействия.

Пример прогнозирования КЭ показан на рис. 9.

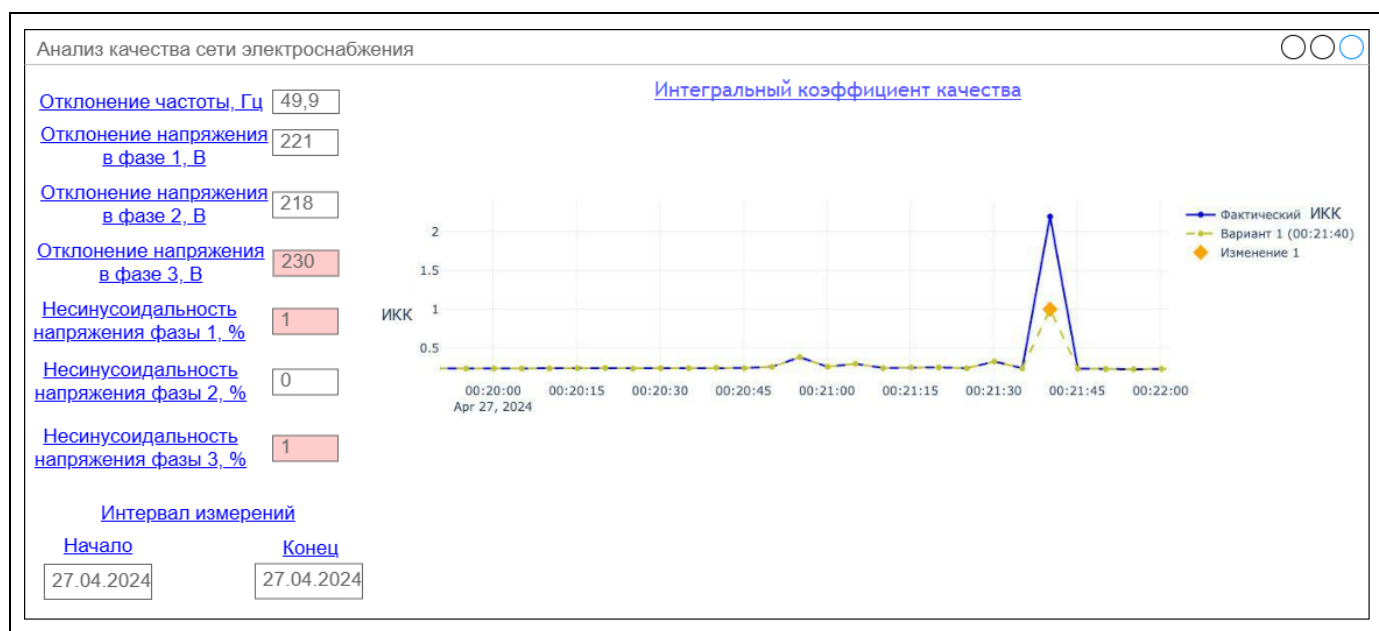


Рис. 9. Пример прогнозирования КЭ

Как видно из рис. 9, в момент времени 00:21:40 фактический ИКК превышает значение 2, т. е. соответствует критически высокому значению для параметров СЭ. После ручного изменения некоторых параметров сети (на рисунке выделено цветом) на графике появилась вторая кривая, которая соответствует прогнозируемому значению и на основании которой специалисты могут принять решение о том, что нужно изменить в параметрах СЭ (практические рекомендации выходят за рамки настоящей статьи).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование предлагает использовать разработанный в Центре интеллектуальной цифровой электроэнергетики ИПУ РАН интегральный критерий качества сетей электроснабжения для экспресс-оценки их функционирования с помощью методики обработки данных, собираемых в системе, аналогичной той, что описана в статье [9].

Поскольку описанный критерий включает в себя одновременно несколько параметров сети электроснабжения, возможно сценарное прогнозирование поведения сети при виртуальном (офлайн) изменении ее параметров (как индивидуально, так и комплексно), таких как частота, напряжение в каждой из фаз, суммарные коэффициенты нелинейных искажений в каждой из фаз.

Работоспособность предложенного подхода проверена на реальных данных [10]. Эксперимен-

тальные исследования разработанного ИКК были проведены на концепте программного обеспечения, визуализирующем данные, собранные датчиками в сети электроснабжения ИПУ РАН.

Предложенный подход может быть рекомендован для включения в следующую редакцию ГОСТ 32144–2013 либо при разработке новых стандартов оценки качества систем электроснабжения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bazenkov, N.I., Dushin, S.V., Goubko, M.V., et. al. An Office Building Power Consumption Dataset for Energy Grid Analysis and Control Algorithms // IFAC-PapersOnLine, 2022. – Vol. 55, no. 9. – P. 111–116.
2. IEEE 1366-2012 – IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. – New York: IEEE, 2012. – DOI: 10.1109/IEEESTD.2012.6209381
3. Приказ Министерства Энергетики от 29 ноября 2016 года N 1256 «Об утверждении Методических указаний по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций (с изменениями на 14 июня 2023 года)». [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated November 29, 2016 No. 1256 (as amended on June 14, 2023) "On Approval of the Methodological Guidelines for Calculating the Level of Reliability and Quality of Supplied Goods and Rendered Services for the Organization Managing the Unified National (All-Russian) Electric Grid and Territorial Grid Organizations." (In Russian)]
4. El-Dabah, M.A., Boghdady, T.A., El-Saadawi, M.M., et al. Comprehensive Power Quality Performance Assessment for the Electrical Power System of a Nuclear Research Reactor // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Art. no. 9915.

5. Xiang, Y., Lin, Y., Zhang, Y., et al. A Grid-Wide Comprehensive Evaluation Method of Power Quality Based on Complex Network Theory // *Energies*, 2024. – Vol. 17, no. 13. – Art. no. 3193.
  6. Liu, Y., Wang, H., Wang, Z., et al. Identification of Composite Power Quality Disturbances Based on Relative Position Matrix // *Frontiers in Energy Research*, 2024. – Vol. 11. – Art. no. 1326522.
  7. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. [GOST 32144-2013. Electrical Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Electrical Energy Quality Standards in General-Purpose Power Supply Systems. – Moscow: Standartinform, 2014. (In Russian)]
  8. Арушанян И.О. Избранные задачи для семинарских занятий по численным методам: векторные и матричные нормы Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 2019. [Arushanyan, I.O. Selected Problems for Seminars on Numerical Methods: Vector and Matrix Norms. Tutorial. – Moscow: Moscow State University, 2019. (In Russian)]
  9. Пащенко А.Ф., Базенков Н.И., Петров И.В. и др. Работы и проекты Центра интеллектуальной энергетики ИПУ РАН // Датчики и системы, 2024. – № 2(274). – С. 3–11. [Pashchenko, A.F., Bazhenkov, N.I., Petrov, I., et al. Works and Projects of the Center of Digital Solutions for Smart Grid of ICS RAS // *Sensors and Systems*, 2024. – No. 2 (274). – P. 3–11. (In Russian)]
  10. Центр интеллектуальной цифровой электроэнергетики ИПУ РАН. Датасеты. – URL: <https://energy.ipu.ru/datasets/> (дата обращения: 19.01.2026). [The Center of Digital Solutions for Smart Grid of ICS RAS. Datasets. – URL: <https://energy.ipu.ru/datasets/> (accessed January 19, 2026).]
- Статья представлена к публикации членом редколлегии И. Б. Ядыкиным.*
- Поступила в редакцию 02.02.2026,  
после доработки 14.04.2026.  
Принята к публикации 14.05.2026.*
- Пащенко Александр Федорович** – канд. техн. наук,  
✉ [a.paschenko@ipu.ru](mailto:a.paschenko@ipu.ru)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6299-4894>
- Цветков Алексей Анатольевич** – мл. науч. сотрудник,  
✉ [tsvetkov-a@ipu.ru](mailto:tsvetkov-a@ipu.ru)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1191-1347>
- Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
г. Москва
- © 2026 г. Пащенко А. Ф., Цветков А. А.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

## ASSESSING AND PREDICTING THE QUALITY OF ELECTRIC POWER SYSTEMS BASED ON AN INTEGRAL CRITERION

A. F. Pashchenko and A. A. Tsvetkov

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ [a.paschenko@ipu.ru](mailto:a.paschenko@ipu.ru), ✉ [tsvetkov-a@ipu.ru](mailto:tsvetkov-a@ipu.ru)

**Abstract.** This paper considers the problem of assessing and predicting the quality of three-phase electric power systems by introducing an integral criterion. The criterion is based on applied and fundamental research in the field of modern power system management, conducted at the Center of Digital Solutions for Smart Grid, the Trapeznikov Institute of Control Sciences, the Russian Academy of Sciences. The integral assessment criterion is based on several key indicators: frequency deviation, slow voltage changes (in each phase), and the total harmonic distortion (in each phase). Practical results of applying this criterion are presented for the data collected in a real electric power system since 2021. The criterion expands the capabilities of assessing the quality of electric power systems compared to those accepted in the industry.

**Keywords:** electric power quality, integral assessment criterion, power system management, predictive modeling.