

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **043256**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.05.02

(51) Int. Cl. **G01R 19/00** (2006.01)

(21) Номер заявки
202292951

(22) Дата подачи заявки
2022.11.14

(54) **СПОСОБ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

(43) **2023.04.28**

(72) Изобретатель:

(96) **2022000105 (RU) 2022.11.14**

**Куликов Александр Леонидович,
Илюшин Павел Владимирович,
Севостьянов Александр
Александрович, Фитасов Анатолий
Николаевич (RU)**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
"НИЖЕГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА" (НГТУ) (RU)**

(74) Представитель:
Куркин А.А. (RU)

(56) **RU-C1-2775150
RU-C1-2741269
EA-A1-200100561
US-B2-9625503**

(57) Изобретение относится к измерительной технике, а именно к оценке показателей качества электрической энергии (КЭЭ) в системах промышленного электроснабжения. Оно может быть использовано для определения влияния показателей КЭЭ в трехфазной системе на функционирование электроприемников конечных промышленных потребителей и последующей оценки необходимости реализации управляющих воздействий с целью восстановления их нормального электроснабжения. Задача изобретения - разработка способа анализа качества электрической энергии в трехфазной системе, реализующего выборочный контроль, а также учитывающего комплексное воздействие совокупности отклонений показателей качества электрической энергии на функционирование конкретного промышленного потребителя. Поставленная задача достигается способом анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения, содержащим этапы, на которых измеряют совокупность электрических величин, при этом совокупность содержит одну электрическую величину на каждую фазу, формируют пространственный вектор на основе моментального трехмерного преобразования совокупности измеренных электрических величин, текущую совокупность комплексных мгновенных значений пространственного вектора нормируют в заданном скользящем окне. Согласно предложению выходной сигнал, характеризующий результаты анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения, формируют на основе выборочного контроля по альтернативному признаку, для чего используют дискретный сигнал, получаемый по результатам сравнения текущего обобщенного параметра качества электрической энергии с его нормируемым значением, в качестве текущего обобщенного параметра качества электрической энергии выбирают модульное значение коэффициента взаимной корреляции, получаемого при сопоставлении в скользящем окне текущей совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора и аналогичной совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора, соответствующей симметричному трехфазному синусоидальному сигналу частоты 50 Гц, нормированное значение обобщенного параметра качества электрической энергии, а также параметры для реализации выборочного контроля по альтернативному признаку определяют по результатам имитационного моделирования системы промышленного электроснабжения с учетом режимов работы электроприемников промышленного потребителя.

B1

043256

043256 B1

Предлагаемое изобретение относится к измерительной технике, а именно к оценке показателей качества электрической энергии (КЭЭ) в системах промышленного электроснабжения. Оно может быть использовано для определения влияния показателей КЭЭ в трехфазной системе на функционирование электроприемников конечных промышленных потребителей и последующей оценки необходимости реализации управляющих воздействий с целью восстановления их нормального электроснабжения.

Известен способ определения показателей качества электрической энергии трехфазной сети [авторское свидетельство СССР № 1109655, МПК G01R 19/00, опубл. 23.08.1984, бюл. № 31] путем сравнения входного и опорного напряжений, где определяют начальную фазу прямой последовательности напряжений трехфазной сети, формируют опорную трехфазную систему напряжений прямой последовательности, начальная фаза которой равна начальной фазе прямой последовательности напряжений трехфазной сети, а амплитуда равна номинальному значению амплитуды напряжения трехфазной сети, а затем из разности входных и опорных напряжений выделяют симметричные составляющие напряжений, по величине которых судят о КЭЭ в трехфазной сети.

Недостаток известного способа определения показателей КЭЭ в трехфазной сети состоит в невозможности его использования для организации выборочного контроля показателей КЭЭ, а также невозможности комплексного учета влияния отклонений показателей КЭЭ на функционирование электроприемников промышленных потребителей.

Известен способ анализа качества электрической энергии в трехфазной электрической сети [патент РФ № 2613584, МПК G01R 19/25, опубл. 17.03.2017, бюл. № 8], содержащий следующие этапы, на которых измеряют совокупность электрических величин, при этом совокупность содержит одну электрическую величину на каждую фазу; формируют пространственный вектор на основании моментального трехмерного преобразования совокупности измеренных электрических величин; определяют совокупность, содержащую по меньшей мере один параметр, характеризующий качество электрической энергии в трехфазной электрической сети, в зависимости от пространственного вектора, вычисленного в скользящем окне.

Недостаток способа состоит в невозможности его использования для организации выборочного контроля показателей КЭЭ, а также невозможности комплексного учета влияния отклонений показателей КЭЭ на функционирование электроприемников промышленных потребителей.

Наиболее близким техническим решением к предлагаемому изобретению является способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения [патент РФ № 2741269, МПК G01R 19/00, опубл. 22.01.2021, бюл. № 3], содержащий этапы, на которых измеряют совокупность электрических величин, при этом совокупность содержит одну электрическую величину на каждую фазу; формируют пространственный вектор на основе моментального трехмерного преобразования совокупности измеренных электрических величин. Согласно предложению текущую совокупность комплексных мгновенных значений пространственного вектора нормируют в заданном скользящем окне и затем подают на блок распознавания, на другие входы которого подают сформированные по результатам имитационного моделирования аналогичные совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора, характерные и соответствующие нарушениям показателей КЭЭ в анализируемой системе электроснабжения промышленного потребителя, по результатам сравнения в блоке распознавания текущей совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора с совокупностями комплексных мгновенных значений пространственного вектора, полученными по результатам имитационного моделирования, определяют соответствующие им условия имитационного моделирования, а также степень и источник искажений токов и напряжений в трехфазной системе промышленного электроснабжения, при этом формируют сигнал, характеризующий нарушения КЭЭ, на выходе блока распознавания.

Недостаток способа-прототипа состоит в невозможности его использования для организации выборочного контроля показателей КЭЭ, а также в его ограниченных возможностях по комплексному учету влияния отклонений показателей КЭЭ на функционирование электроприемников промышленных потребителей.

У промышленных потребителей, использующих зарубежные производственные технологические линии, технические характеристики которых соответствуют требованиям зарубежных стандартов по КЭЭ, имеются риски по выпуску некачественной продукции, даже в условиях соблюдения требований межгосударственного стандарта (ГОСТ 32144-2013) по КЭЭ в системах электроснабжения общего назначения [например, Вагин Г.Я., Куликов А.Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции, 2019, № 6 (1055), с. 54-59]. Отсутствие гармонизации стандартов заставляет промышленные предприятия разрабатывать специальные технические и организационные мероприятия по управлению КЭЭ. Для конкретной системы электроснабжения промышленный потребитель имеет возможность разработать варианты восстановления показателей КЭЭ, влияющих на технологический процесс и зависящих от схемно-режимных условий. Важно то, что ограничения на отклонения показателей КЭЭ зависят от особенностей технологического процесса промышленного потребителя и влияния показателей КЭЭ на качество выпускаемой продукции.

Введенная система показателей КЭЭ (ГОСТ 32144-2013) определяет лишь состав и допустимые диапазоны отклонений отдельных показателей. На практике имеет место комплексное (интегрированное) воздействие на электроустановки потребителей. Искажения токов и напряжений в результате совокупных отклонений показателей КЭЭ, находящихся на границах допустимых значений, могут привести к существенным ущербам у потребителей. При организации процедуры анализа показателей КЭЭ целесообразна реализация следующих задач в системах промышленного электроснабжения:

формирование обобщенного параметра КЭЭ, с помощью которого возможна оценка комплексных воздействий совокупности отклонений показателей КЭЭ на функционирование конкретного промышленного потребителя;

определение диапазонов допустимых отклонений обобщенного параметра КЭЭ, не приводящих к ущербам у потребителей из-за указанных отклонений; формирование таких допустимых диапазонов целесообразно осуществить с использованием данных имитационного моделирования для конкретных схемно-режимных условий функционирования промышленного потребителя;

разработка процедуры контроля показателей КЭЭ на основе обобщенного параметра для последующего принятия решения по реализации организационно-технических мероприятий с целью введения показателей КЭЭ в допустимые диапазоны.

В отношении показателей КЭЭ следует отметить, что их отклонения в точке присоединения (ГОСТ 32144-2013) подразделяют на продолжительные изменения и случайные события, которые ввиду кратковременности последних, как правило, не оказывают какого-либо влияния на электроустановки потребителей, а по результатам таких отклонений не следует реализовать организационно-технические мероприятия по восстановлению показателей КЭЭ. С другой стороны, для систем электроснабжения с источниками распределенной генерации, включая объекты на основе возобновляемых источников энергии, характерны быстро изменяющиеся режимы, сопровождающиеся существенными отклонениями показателей КЭЭ. При этом для оценки токов и напряжений в системах электроснабжения выделяются короткие временные интервалы (скользящее окно данных), составляющие, например [Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией / П.В. Илюшин, А.Л. Куликов. - Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. - 364 с.], один период промышленной частоты. Требуемой разрешающей способности по частоте для определения, например, искажающих гармоник [например, Рибейро Пауло Ф., Дуке Карлос А., да Силвейра Пауло М., Серкейра Аугусто С. Обработка сигналов в интеллектуальных сетях энергосистем. - М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. - 480 с.] на таких коротких временных интервалах не удается достичь. Вследствие этого результаты вычисления некоторых показателей КЭЭ будут не точными и не адекватными реальной ситуации с искажениями токов и напряжений.

Таким образом, актуальной является задача разработки алгоритмов принятия решения при отклонениях показателей КЭЭ от нормируемых значений, учитывающих технологические особенности промышленного производства конкретного потребителя и основывающихся на методах математической статистики.

Установление соответствия требованиям нормативов (ГОСТы, технические условия на технологические установки потребителей и др.) обеспечивается проведением контроля при мониторинге показателей КЭЭ. В зависимости от особенностей системы промышленного электроснабжения, а также финансовых возможностей потребителей и предприятий электрических сетей может быть организован как непрерывный, так и выборочный контроль показателей КЭЭ. При непрерывном контроле оценка КЭЭ осуществляется в каждый момент времени во всех точках присоединения потребителей и с расчетом всех показателей КЭЭ. Исходя из экономической целесообразности такая форма контроля зачастую является неприемлемой. В качестве альтернативного варианта возможна организация выборочного контроля, когда оценивают показатели КЭЭ, например, на отдельных выборочных интервалах времени, в заранее определенных точках контроля с расчетом только тех показателей КЭЭ, которые являются критичными для конкретного промышленного потребителя, с учетом особенностей его технологического процесса.

Результаты контроля могут быть применены не только для оценки показателей КЭЭ, но и для реализации организационно-технических мероприятий по приведению этих показателей в соответствие с нормируемыми значениями.

В первом случае решается чисто контрольная аналитическая задача соответствия поставляемой электрической энергии требованиям нормативных документов, а также исследования влияния потребителей друг на друга.

Во втором случае реализация организационно-технических мероприятий направлена на предотвращение ущерба потребителей путем периодического наблюдения за параметрами токов и напряжений промышленной частоты и вмешательства в режимы электропотребления путем своевременной выдачи управляющих воздействий на элементы силового электротехнического оборудования для предотвращения отклонений показателей КЭЭ от нормируемых значений.

В обоих случаях выборочный контроль показателей КЭЭ целесообразно организовать на специальных выборочных процедурах математической статистики [например, Беляев Ю.К. Вероятностные методы выборочного контроля. - М.: Наука, 1975. - 408 с.]. При таком контроле, например, путем наблюдения

на ограниченном (коротком) интервале времени формируется вывод о соблюдении требований к показателям КЭЭ на временном периоде до следующего выборочного контроля.

С экономической точки зрения, с целью минимизации затрат на проведение контрольных операций, целесообразна организация контроля показателей КЭЭ по альтернативному признаку [ГОСТ Р 50779.70-2018]. При таком контроле в точках присоединения электроустановок потребителей по рассчитанным показателям КЭЭ устанавливают справедливость альтернативных гипотез о их соответствии или несоответствии требованиям нормативных документов (прежде всего, ГОСТ 32144-2013).

Задача изобретения - разработка способа анализа качества электрической энергии в трехфазной системе, реализующего выборочный контроль, а также учитывающего комплексное воздействие совокупности отклонений показателей качества электрической энергии на функционирование конкретного промышленного потребителя.

Поставленная задача достигается способом анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения, содержащим этапы, на которых измеряют совокупность электрических величин, при этом совокупность содержит одну электрическую величину на каждую фазу, формируют пространственный вектор на основе моментального трехмерного преобразования совокупности измеренных электрических величин, текущую совокупность комплексных мгновенных значений пространственного вектора нормируют в заданном скользящем окне. Согласно предложению выходной сигнал, характеризующий результаты анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения, формируют на основе выборочного контроля по альтернативному признаку для чего используют дискретный сигнал, получаемый по результатам сравнения текущего обобщенного параметра качества электрической энергии с его нормируемым значением, в качестве текущего обобщенного параметра качества электрической энергии выбирают модульное значение коэффициента взаимной корреляции, получаемого при сопоставлении в скользящем окне текущей совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора и аналогичной совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора, соответствующей симметричному трехфазному синусоидальному сигналу частоты 50 Гц, нормированное значение обобщенного параметра качества электрической энергии, а также для реализации выборочного контроля по альтернативному признаку, определяют по результатам имитационного моделирования системы промышленного электроснабжения с учетом режимов работы электроприемников промышленного потребителя.

На фиг. 1 представлена структурная схема устройства, реализующего способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения.

Устройство, реализующее способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения (фиг. 1), включает последовательно соединенные модуль сбора данных 1, модуль трехмерного преобразования 2, модуль нормировки 3, блок корреляции 4, модуль детектирования 6, блок сравнения 7, блок последовательного анализа 8, а также блок 5 хранения результатов имитационного моделирования. Первый и второй выходы блока 5 хранения результатов имитационного моделирования подключены соответственно ко вторым входам блоков 7 и 8. На первый и второй входы блока 5 хранения результатов имитационного моделирования поступает информация о текущем режиме работы системы промышленного электроснабжения и результатах имитационного моделирования. Вход модуля 1 сбора данных и выход блока 8 последовательного анализа подключены соответственно ко входу и выходу устройства, реализующего способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения.

Устройство (фиг. 1), реализующее способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения, функционирует следующим образом.

Разработка способа анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения продиктована свойствами нагрузки промышленного потребителя, особенностями его технологических процессов и управления ими, величиной ущербов при нарушении производственных процессов, вызванных отклонениями показателей КЭЭ, а также экономической целесообразностью проведения выборочного контроля при анализе показателей КЭЭ.

В каждой отдельной точке присоединения промышленного потребителя будет характерен собственный набор искажений синусоидальности токов и напряжений, зависящий от технологических особенностей нагрузки и режимов функционирования системы электроснабжения, определяемый, в том числе, посредством имитационного моделирования.

Для обеспечения эффективного функционирования способа анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения реализуется предварительное имитационное моделирование, целями которого являются

определение режимов функционирования системы промышленного электроснабжения, с учетом особенностей промышленной нагрузки, а также возможностей проведения работ по ремонтно-эксплуатационному обслуживанию;

выявление режимов и точек присоединения электроприемников промышленного потребителя, в которых возможны существенные отклонения показателей КЭЭ, требующих реализации выборочного контроля показателей КЭЭ и мероприятий по восстановлению нормального функционирования системы

промышленного электроснабжения;

определение допустимых диапазонов отклонения обобщенного параметра КЭЭ, а также показателей КЭЭ для проведения соответствующей процедуры выборочного контроля в моделируемых режимах и анализируемых точках присоединения.

При реализации способа анализа качества электрической энергии и выполнении предварительного имитационного моделирования формируется база данных допустимых отклонений обобщенного параметра КЭЭ в анализируемых точках присоединения и режимах функционирования системы промышленного электроснабжения, а также требуемых показателей КЭЭ для проведения процедуры выборочного контроля. Результаты имитационного моделирования вносятся в память блока 5 хранения результатов моделирования (фиг. 1).

Модуль 1 устройства, реализующего способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения (фиг. 1) выполнен с возможностью подключения к каждой фазе трехфазной электрической сети и периодического измерения фазных значений токов и напряжений в анализируемых точках присоединения. В модуле 1 выполняется аналого-цифровое преобразование и на его выход подаются мгновенные значения фазных токов и напряжений.

Модуль 1 (фиг. 1) подключен к модулю 2 трехмерного преобразования. В каждый момент времени модуль 2 принимает мгновенные значения фазных токов и/или напряжений $x_a(n)$, $x_b(n)$, $x_c(n)$ (где n - текущее дискретное время), измеренных в анализируемой точке присоединения трехфазной электрической сети. В модуле 2 осуществляется преобразование Кларк, являющееся разновидностью преобразования симметричных составляющих,

$$\begin{bmatrix} x_\alpha(n) \\ x_\beta(n) \\ x_0(n) \end{bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a(n) \\ x_b(n) \\ x_c(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Две первые составляющие, полученные в результате преобразования (1), объединяются для получения комплексного числа, зависящего от дискретного времени и называемого пространственным вектором:

$$\underline{x}(n) = x_\alpha(n) + jx_\beta(n). \quad (2)$$

Пространственный вектор содержит всю необходимую информацию об исходной трехфазной системе для анализа КЭЭ. Если трехфазная система является сбалансированной (уравновешенной), то пространственный вектор описывает окружность на комплексной плоскости. Нарушение синусоидальности сигналов токов и напряжений приводит к деформации пространственного вектора, видимой на комплексной плоскости. Деформации позволяют характеризовать и количественно определять различные нарушения, влияющие на трехфазную электрическую сеть [патент РФ № 2613584, МПК G01R 19/25, опубл. 17.03.2017, бюл. № 8].

Мгновенные значения комплексного вектора из модуля 2 устройства поступают на модуль 3 нормировки. В модуле 3 в скользящем окне данных, включающем, например, N комплексных отсчетов (мгновенных значений) пространственного вектора, производится их нормировка (приведение к нормированному виду) по энергии. Для этого вычисляется энергия совокупности N комплексных значений пространственного вектора в текущем скользящем окне, и каждое из комплексных мгновенных значений пространственного вектора этого текущего скользящего окна нормируется к рассчитанной энергии.

В последующем нормированные совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора из модуля 3 поступают в блок 4 корреляции. В блоке 4 корреляции производится расчет обобщенного параметра КЭЭ, в качестве которого выступает коэффициент корреляции и непосредственно связан с понятием когерентности.

Когерентность является основополагающим понятием и используется в различных технических приложениях, связанных с искаженными и флюктуирующими физическими величинами. Большая советская энциклопедия дает следующее определение когерентности: "Когерентность (от латинского *cohaerens* - находящийся в связи) - согласованное протекание во времени нескольких колебательных или волновых процессов, проявляющееся при их сложении. Колебания называются когерентными, если разность их фаз остается постоянной во времени и при сложении колебаний определяет амплитуду суммарного колебания. Два гармонических (синусоидальных) колебания одной частоты всегда когерентны".

Качество электрической энергии оценим с помощью коэффициента корреляции, характеризующего искажения синусоидальности анализируемого сигнала, а также нарушение требований когерентности [Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: Справочник / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Маляренко и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радиотехника, 2007. - 512 с.].

Отметим, что в способе-прототипе [Патент РФ № 2741269, МПК G01R 19/00, опубл. 22.01.2021, бюл. № 3] расчет коэффициента корреляции используется в процессе распознавания для определения степени схожести нормированных сигналов между собой. Причем "чем больше значение действительной части коэффициента корреляции, тем меньше энергия разностного сигнала и тем больше сигналы подобны друг другу по форме. При совпадении сравниваемых комплексных дискретных сигналов коэффициент корреляции максимален и равен их энергии. Таким образом, сравнение комплексных дискрет-

ных сигналов может также осуществляться и на основе анализа значений коэффициента корреляции. При этом гарантируется, что максимальное значение действительной части коэффициента корреляции будет получено только в случае совпадения по форме анализируемого и эталонного комплексных дискретных сигналов".

Свойства модуля коэффициента корреляции аналогичны свойствам его действительной части, поэтому при организации процедуры оценки КЭЭ может использоваться и модуль коэффициента корреляции.

Если трехфазный сигнал напряжения (тока) имеет синусоидальную форму, соответствует частоте 50 Гц и симметричен, то совокупность мгновенных значений его пространственного вектора может выступать в виде эталонного комплексного сигнала, относительно которого целесообразно оценивать отклонения КЭЭ у совокупности мгновенных значений пространственного вектора анализируемого сигнала. Если анализируемый сигнал нормирован и соответствует эталонному, то модуль их взаимного коэффициента корреляции равен единице. Таким образом, модуль комплексного коэффициента корреляции анализируемого и эталонного сигналов может выступать в качестве обобщенного параметра при оценке требований КЭЭ в конкретной точке присоединения промышленного потребителя. С учетом особенностей электроприемников промышленного потребителя, подключенных к анализируемой точке присоединения, при проведении имитационного моделирования оценивают допустимую величину отклонения модульного значения коэффициента взаимной корреляции между эталонным и анализируемым сигналами пространственного вектора. Такая допустимая величина отклонения модульного значения коэффициента взаимной корреляции может использоваться в качестве уставочного значения, а его превышение выступать как дискретный признак нарушения допустимого значения обобщенного параметра КЭЭ.

Вычисление коэффициента взаимной корреляции пространственного вектора осуществляется в блоке 4 корреляции устройства (фиг. 1), реализующего предлагаемый способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения. В качестве блока 4 корреляции может выступать устройство цифровой фильтрации (цифровой фильтр), импульсная характеристика которого соответствует эталонному сигналу пространственного вектора.

Мгновенные значения комплексного коэффициента взаимной корреляции подаются на модуль 6 детектирования для получения их модульных значений. Модульные значения с выхода модуля 6 детектирования поступают на первый вход блока 7 сравнения, на вторые входы которого из блока 5 хранения результатов имитационного моделирования поступает уставочное значение, соответствующее допустимому отклонению модульного значения коэффициента взаимной корреляции для анализируемой точки присоединения и текущего режима. По результатам сравнения формируется дискретный двоичный сигнал (0 или 1), используемый для реализации математических операций выборочного контроля в блоке 8.

В блок 5 хранения результатов имитационного моделирования устройства (фиг. 1), реализующего способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения, поступает информация о текущем режиме, выраженная, например, в виде номера режима. Такая информация может поступать, например, из SCADA-системы или из систем диспетчерско-технологического управления системой электроснабжения (оперативно-информационного комплекса - ОИК). Номер режима определяет текущий набор уставочных значений, выдаваемых с выходов блока 5 хранения результатов имитационного моделирования в блок 7 сравнения при анализе контролируемых точек присоединения системы промышленного электроснабжения. Дополнительно на второй вход блока 8 последовательного анализа с выхода блока 5 хранения результатов имитационного моделирования для каждого режима и точки присоединения выдаются параметры (величины k_1 , k_2 , a , b - выражение (7)), необходимые для выполнения контрольных выборочных процедур.

С выхода блока 7 сравнения на первый вход блока 8 последовательного анализа поступает последовательность случайных величин $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, \dots$. Здесь ξ_n - дискретная величина, значение которой характеризует КЭЭ и соответствует результату анализа КЭЭ в текущий момент времени. Обозначим через q вероятность того, что ξ_n примет значение 1, а задачу контроля (анализа) обобщенного показателя КЭЭ сведем к задаче проверки гипотезы о том, что q не превышает некоторой заданной величины q' .

При анализе КЭЭ с применением цифровой обработки сигналов (фиг. 1) на заданном выборочном интервале времени имеем большой массив мгновенных значений обобщенного параметра КЭЭ, последовательно поступающих с входа блока 6. Предположим, что значение обобщенного параметра КЭЭ в каждый момент времени может превышать или не превышать допустимый диапазон значений (дискретный сигнал ξ_n на выходе блока 7), и, в соответствии с этим, КЭЭ в заданный момент времени может признаваться соответствующим, или не соответствующим требуемым нормам в конкретной точке присоединения и в конкретном режиме работы системы электроснабжения. Примем значение $\xi_n=0$, если в текущий момент времени требования КЭЭ соответствуют нормам, и $\xi_n=1$ при нарушениях требований к КЭЭ. Предположим, что переменная q означает относительное число моментов времени, когда имеют место нарушения КЭЭ.

Применительно к схеме (фиг. 1) величина ξ_n принимает значение 0 или 1 с вероятностями $P\{\xi_n=0\}=(1-q)$ и $P\{\xi_n=1\}=q$, где q - вероятность снижения модульного значения коэффициента корреля-

ции ниже нормируемого (уставочного) значения для текущего режима функционирования системы промышленного электроснабжения.

Целесообразно задать такую величину q' , чтобы при $q \leq q'$ принималось решение о соответствии требованиям КЭЭ на всем выборочном массиве (интервале) наблюдений, а при $q > q'$ - соответствие требованиям не выполнялось.

Отметим, что непрерывная проверка совокупности выборочных значений обобщенного параметра КЭЭ во всех точках присоединения системы промышленного электроснабжения затратна по времени и требует больших финансовых затрат, а порой и нецелесообразна, исходя из схемно-режимных условий. Для организации рационального плана проведения выборочного анализа КЭЭ необходимо устанавливать риски, характерные для неправильного принятия решений.

Учтем, что при $q = q'$ КЭЭ находится на границе допустимого и не важно какое решение принимать. Если $q > q'$, то целесообразно принимать решение о нарушении требований к КЭЭ, причем с увеличением q , увеличивается и степень целесообразности. Если $q < q'$ считаем, что КЭЭ находится в допустимых пределах, а степень уверенности при этом увеличивается с уменьшением q .

В случае, если q незначительно отличается от q' то величины ошибок в принятии решений относительно КЭЭ невелики. Поэтому возможно задание таких величин q_0 и q_1 ($q_0 < q'$ и $q_1 > q'$), что принятие решения и ненадлежащем КЭЭ, приводящем к ущербам для потребителя, рассматривается только тогда, когда $q \geq q_1$, а принятие решения о надлежащем КЭЭ, не приводящем к ущербам, когда $q \leq q_0$. При значениях q , находящихся в диапазоне от q_0 до q_1 , никакое решение не принимается.

Если заданы значения q_0 и q_1 , то допустимый риск, связанный с принятием неверных решений, определяется следующим образом:

вероятность классифицировать отклонения показателей КЭЭ не должна превышать предварительно заданную величину α , когда $q \leq q_0$;

вероятность классифицировать отсутствие отклонений показателей КЭЭ не должна превышать предварительно заданную величину β , когда $q \geq q_1$.

Следовательно, риск неправильного принятия решений определяется четырьмя величинами: q_0 , q_1 , α , β . Выбор этих величин реализуется статистическими методами, например, с помощью таблиц, графиков и др. [Вальд А. Последовательный анализ. Пер. с англ. - М.: Физматгиз, 1960. - 328 с.]. Однако в современных условиях целесообразно определение величин q_0 , q_1 , α , β на основе реализации имитационного моделирования системы промышленного электроснабжения в различных схемно-режимных условиях, в том числе при отклонениях показателей КЭЭ от нормируемых значений.

В блоке 8 последовательного анализа реализуется биномиальная схема испытаний [ГОСТ Р 50779.70-2018. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Введение в стандарты ГОСТ ИСО 2859], согласно которой по результатам фиксации величины ξ_n осуществляется проверка гипотез [Вальд А. Последовательный анализ. Пер. с англ. - М.: Физматгиз, 1960. - 328 с.],

$$H_0: q = q_0 \text{ и } H_1: q = q_1, \quad (3)$$

где q_0 и q_1 - заданные критические уровни вероятностей для анализа КЭЭ, причем $q_0 < q_1$.

В каждый текущий n -й момент анализа показателей КЭЭ имеем случайную величину ξ_n , закон распределения которой соответствует выражению

$$p(\xi; q) = q^\xi \cdot (1 - q)^{1-\xi}, \quad (4)$$

где ξ принимает значения 0 или 1.

Для принятия решения рассчитывается отношение правдоподобия η , которое на n -м шаге анализа КЭЭ принимает вид

$$\begin{aligned} \eta_n(\xi_1, \dots, \xi_n) &= [p(\xi_1; q_1) \cdot p(\xi_2; q_1) \cdot \dots \cdot p(\xi_n; q_1)] / [p(\xi_1; q_0) \cdot p(\xi_2; q_0) \cdot \dots \cdot p(\xi_n; q_0)] = \\ &= (q_1 / q_0)^{D_n} \cdot [(1 - q_1) / (1 - q_0)]^{n - D_n}, \end{aligned} \quad (5)$$

где D_n - случайная величина, характеризующая суммарное число отклонений мгновенных значений модуля коэффициента корреляции от нормативного значения для текущего режима, $D_n = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n$.

Пусть dn - значение случайной величины D_n , тогда область, в пределах которой испытания продолжаются для последовательного критерия Вальда, будет определяться неравенствами

$$B < (q_1 / q_0)^{dn} \cdot [(1 - q_1) / (1 - q_0)]^{n - dn} < A, \quad (6)$$

где $A = (1 - \beta) / \alpha$;

$B = \beta / (1 - \alpha)$;

α и β - ошибки первого и второго рода

[Вальд А. Последовательный анализ. Пер. с англ. - М.: Физматгиз, 1960. - 328 с.] (в терминах производственного контроля - риски поставщика и потребителя [ГОСТ Р 50779.70-2018. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Введение в стандарты ГОСТ ИСО 2859]).

После несложных математических преобразований выражение (6) может быть приведено к виду

$$k_1 \cdot n - k_2 \cdot b < dn < k_1 \cdot n + k_2 \cdot a, \quad (7)$$

где $a = \ln A > 0$;

$b = -\ln B > 0$,

$$k_2 = 1 / \ln [q_1 \cdot (1 - q_0) / (1 - q_1) \cdot q_0]; \quad k_1 = k_2 \cdot \ln [(1 - q_0) / (1 - q_1)]. \quad (8)$$

Последовательные испытания продолжаются при соблюдении условия (7) (т.е. оба неравенства выполняются) и прекращаются на том шаге процедуры контроля показателей КЭЭ, когда нарушается любое из неравенств. Нарушение левого неравенства приводит к принятию гипотезы H_0 : $q=q_0$, а нарушение правого неравенства - гипотезы H_1 : $q=q_1$.

На плоскости наблюдений (n, dn) границы, характеризующие области принятия гипотез, обозначаются прямыми линиями (фиг. 2):

$dn = k_1 \cdot n - k_2 \cdot b$ - граничная прямая для области принятия гипотезы H_0 ;

$dn = k_1 \cdot n + k_2 \cdot a$ - граничная прямая для области принятия гипотезы H_1 .

Фиг. 2а, 2б иллюстрирует процесс принятия решения при последовательном анализе с помощью обобщенного параметра КЭЭ. Фиг. 2а - процесс последовательного анализа, заканчивающийся принятием гипотезы H_1 ; а фиг. 2б - принятием гипотезы H_0 .

Результаты анализа показателей КЭЭ выражаются в значениях дискретного сигнала с выхода блока 8 последовательного анализа. Появление единичного сигнала с выхода блока 8 свидетельствует об отклонении показателей КЭЭ от нормируемых значений, которые могут привести к возникновению ущербов у потребителя, и необходимости принятия мер по восстановлению КЭЭ.

Таким образом, достигается цель изобретения, заключающаяся в разработке способа анализа качества электрической энергии в трехфазной системе, реализующего выборочный контроль, а также учитывающего комплексное воздействие совокупности отклонений показателей КЭЭ на функционирование конкретного промышленного потребителя.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения, содержащий этапы, на которых

измеряют совокупность электрических величин, при этом совокупность содержит одну электрическую величину на каждую фазу;

формируют пространственный вектор на основе моментального трехмерного преобразования совокупности измеренных электрических величин;

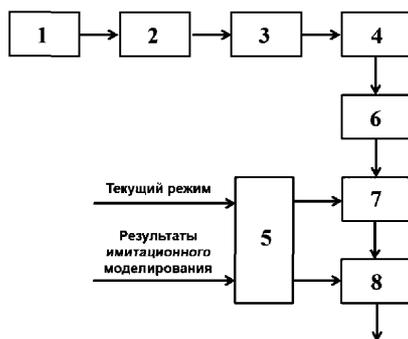
текущую совокупность комплексных мгновенных значений пространственного вектора нормируют в заданном скользящем окне,

отличающийся тем, что

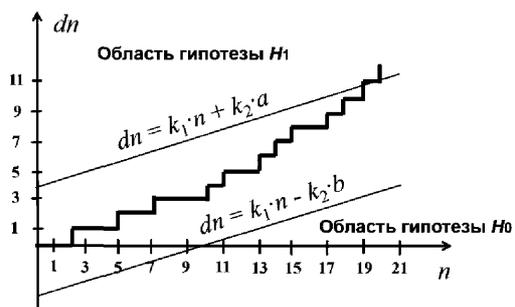
выходной сигнал, характеризующий результаты анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения, формируют на основе выборочного контроля по альтернативному признаку, для чего используют дискретный сигнал, получаемый по результатам сравнения текущего обобщенного параметра качества электрической энергии с его нормируемым значением;

в качестве текущего обобщенного параметра качества электрической энергии выбирают модульное значение коэффициента взаимной корреляции, получаемого при сопоставлении в скользящем окне текущей совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора и аналогичной совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора, соответствующей симметричному трехфазному синусоидальному сигналу частоты 50 Гц;

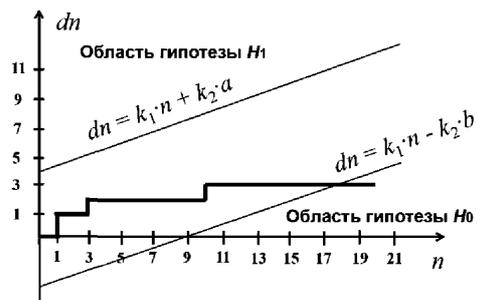
нормированное значение обобщенного параметра качества электрической энергии, а также параметры для реализации выборочного контроля по альтернативному признаку определяют по результатам имитационного моделирования системы промышленного электроснабжения с учетом режимов работы электроприемников промышленного потребителя.



Фиг. 1



а.



б.

Фиг. 2

