

Применение статистического выборочного контроля при мониторинге показателей качества электрической энергии в современных системах электроснабжения

КУЛИКОВ А. Л., ИЛЮШИН П. В., СЕВОСТЬЯНОВ А. А.

Statistical sampling for monitoring electric power quality in state-of-the-art power supply systems

KULIKOV A. L., ILYUSHIN P. V., SEVOSTYANOV A. A.

Рассмотрены задачи и особенности функционирования современных систем электроснабжения, а также последствия значительных отклонений показателей качества электрической энергии от нормативных значений. Приведены основные функции систем мониторинга качества электроэнергии, получающих информацию от интеллектуальных электронных устройств и приборов контроля качества электроэнергии, установленных в системах электроснабжения. Представлены критерии для определения целесообразности внедрения систем непрерывного мониторинга или статистического выборочного контроля показателей качества электроэнергии. Предложено использование комплексного показателя качества, на основе которого могут формироваться в автоматическом (автоматизированном) режиме управляющие воздействия для введения показателей качества электроэнергии в область нормативных значений. Показано, что результаты предварительного имитационного моделирования позволяют выявлять режимы и точки присоединения электроприемников, в которых возможны значительные отклонения показателей качества, сопровождающиеся существенными ущербами. Представлено разработанное устройство, реализующее выборочный контроль по альтернативному признаку, с применением последовательного анализа и комплексного показателя качества электроэнергии.

Ключевые слова: система электроснабжения, показатели качества электрической энергии, мониторинг, статистический выборочный контроль, имитационное моделирование, последовательный анализ.

DOI: 10.53891/00135860_2022_4_46

Основная задача современных систем электроснабжения (СЭС) – обеспечение надежного электроснабжения электроприемников потребителей в различных схемно-режимных ситуациях. В условиях широкого внедрения возобновляемых источников энергии и сложного прогнозирования

The tasks and features of the functioning of modern power supply systems are considered, as well as the consequences of significant deviations in the quality of electrical energy from the normative values. The main functions of electricity quality monitoring systems receiving information from intelligent electronic devices and electricity quality control devices installed in power supply systems are given. The criteria for determining the feasibility of implementing continuous monitoring systems or statistical sampling control of electricity quality indicators are presented. The use of a complex quality indicator is proposed, on the basis of which control actions can be formed in an automatic (automated) mode to introduce electricity quality indicators into the field of normative values. It is shown that the results of preliminary simulation modeling allow us to identify modes and connection points of electrical receivers in which significant deviations in quality indicators are possible, accompanied by significant damage. A developed device is presented that implements selective control on an alternative basis, using sequential analysis and a comprehensive indicator of the quality of electricity.

Key words: power supply system, electric energy quality indicators, monitoring, statistical sampling, simulation modeling, sequential analysis.

электропотребления активных потребителей в СЭС фиксируется увеличение амплитуды случайных флуктуаций режимных параметров с существенными отклонениями показателей качества электроэнергии (ПКЭЭ) от нормативных значений [1].

Существенные отклонения ПКЭЭ могут ока-

зывать влияние на чувствительные к нарушениям синусоидальности токов и напряжений особо ответственные электроприемники, например, современные технологические линии, системы автоматического управления технологическими процессами, серверное и сетевое оборудование центров хранения и обработки данных и др., вызывая повышенный износ их элементов и приводя к отключениям электрическими и технологическими защитами.

Для фиксации изменений качества электроэнергии (КЭЭ) применяют специальные системы мониторинга, реализующие один из двух подходов. Первый основан на централизованной обработке данных, требует большой пропускной способности каналов связи и вычислительной мощности центрального процессора. При этом в качестве источников информации для расчета ПКЭЭ выступают различные интеллектуальные электронные устройства: устройства синхронизированных векторных измерений, терминалы цифровой релейной защиты и автоматики, устройства сопряжения с объектом цифровых подстанций и др. Второй подход основан на децентрализованном принципе, требующем наличия в приборах контроля КЭЭ широкого набора микросхем: цифровых сигнальных процессоров (DSP), программируемых логических интегральных схем (ПЛИС, FPGA) или ASIC (интегральная схема специального назначения), а также низкоскоростной системы коммуникаций [2].

Цель статьи – обоснование целесообразности использования статистического выборочного контроля ПКЭЭ для определения их соответствия установленным требованиям, а также применения комплексного ПКЭЭ, на основе которого могут в автоматическом (автоматизированном) режиме формироваться управляющие воздействия для введения ПКЭЭ в область нормативных значений.

Методы формирования комплексного ПКЭЭ

Функционирование систем мониторинга качества электроэнергии (СМКЭЭ) основывается на сборе данных о токах (напряжениях), их первичной обработке и передаче в систему хранения, последующем анализе и интерпретации данных для последующего принятия решений о дальнейших действиях (рис. 1).

Анализ и интерпретация данных о КЭЭ тра-

диционно выполнялись вручную, но современные достижения в области цифровой обработки сигналов и интеллектуальных методов принятия решений позволили разработать и внедрить автоматические системы.

С технологической стороны СЭС характеризуются не только количественными характеристиками (мощность и объем электроэнергии), необходимыми для потребителей, но и качественными, в виде совокупности ПКЭЭ (комплексным ПКЭЭ и его дисперсией). Первые два центральных момента статистического распределения показателя (среднее значение и дисперсия) в полной мере характеризуют как измеряемые (количественные) признаки качества, так и неизмеримые – качественные (альтернативные) признаки.

Пусть ζ – комплексный ПКЭЭ, включающий информацию об отклонениях отдельных ПКЭЭ. Каждое значение ζ_i для i -го мгновенного значения показателя ζ является следствием возмущений, вносимых одним или несколькими потребителями, внешними возмущениями и повреждениями в электрической сети. Среднее значение ζ и дисперсия $\sigma \zeta^2$ комплексного ПКЭЭ из N мгновенных значений (контрольной выборки) учитывают все указанные влияния.

Как любой технологический процесс, электроснабжение потребителей является абсолютно управляемым, если выполняются три условия:

- процесс исследован, причем все воздействующие факторы и возмущения выявлены (идентифицированы), а также минимизированы до такой степени, что отсутствуют один, два или три внешних воздействующих фактора, вносящих преобладающий вклад в сумму дисперсий отдельных ПКЭЭ. С математической точки зрения это соответствует выполнению условий центральной предельной теоремы [3] на технологическом уровне, когда вклад в общую дисперсию комплексного ПКЭЭ каждого потребителя и каждого воздействующего фактора оценен с помощью имитационной модели СЭС или экспериментально;

- технологический процесс в СЭС является регулируемым и имеет обратную связь, позволяющую привести значения отдельных ПКЭЭ к нормативным, а во всех точках присоединения потребителей организован непрерывный мониторинг ПКЭЭ;



Рис. 1. Процесс мониторинга показателей качества электроэнергии

– процесс электроснабжения устойчив, а размах отклонений ПКЭЭ $\Delta \zeta$ для любой совокупности выборочных значений не превышает заданного нормативными документами диапазона с учетом доверительных интервалов (рисков, ошибок первого и второго рода).

Выборочный контроль рекомендуется, если не выполняется любое из двух последних условий или оба вместе. Если не выполняется первое условие, то выборочный контроль рекомендуется по альтернативному признаку, так как стандартные системы контроля разработаны только для нормально распределенных количественных признаков.

Под КЭЭ принято понимать степень соответствия параметров электроэнергии их нормативным значениям, однако это характеризует только техническую сторону проблемы. Согласно концепции Total Quality Management под КЭЭ следует понимать совокупность свойств электроэнергии в заданной точке присоединения, позволяющей в максимальной степени удовлетворять потребности потребителей при минимальном ущербе для оборудования, персонала и окружающей среды [4]. Поэтому следует учитывать возможные ущербы от использования электроэнергии ненадлежащего качества. Особую роль играет место контроля ПКЭЭ, позволяющее учитывать специфические особенности потребителей, электросетевого (генерирующего) оборудования, окружающей среды и др.

В [5] определены лишь единичные ПКЭЭ, но подобно тому, как физические величины подразделяются на основные и производные, целесообразно ввести деление ПКЭЭ на единичные и комплексные. Так, единичные ПКЭЭ характеризуют лишь одно из свойств, определяющее КЭЭ, а комплексные – сразу несколько. Комплексные ПКЭЭ могут быть связаны с единичными через функциональные зависимости или взвешенную комбинацию параметров и иметь определенные свойства, влияющие на уровень ущерба.

При анализе качества продукции распространение получили методы формирования комплексных показателей ζ с применением статистических взвешенных оценок [6]:

– среднеарифметической

$$\zeta_1 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n k_i \cdot \xi_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n k_i \right)}, \quad (1)$$

где k_i – i -й весовой коэффициент; ξ_i – i -й ПКЭЭ; i – параметр усреднения; n – количество анали-

зируемых ПКЭЭ, учитываемых в комплексном показателе;

– среднеквадратической

$$\zeta_2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n k_i \cdot \xi_i^2 \right)}{\left(\sum_{i=1}^n k_i \right)}, \quad (2)$$

– среднегеометрической

$$\zeta_3 = \frac{\left(\prod_{i=1}^n \xi_i^{k_i} \right)}{\left(\sum_{i=1}^n k_i \right)}. \quad (3)$$

Для упрощения анализа КЭЭ и обеспечения одинаковых условий оценки сумму весовых коэффициентов, как правило, принимают за единицу:

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1. \quad (4)$$

При этом выражения (1) – (3) принимают вид:

$$\zeta_1 = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \xi_i; \quad \zeta_2 = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \xi_i^2; \quad \zeta_3 = \prod_{i=1}^n \xi_i^{k_i}. \quad (5)$$

Введение комплексных показателей свойственно не только анализу КЭЭ. Например, надежность электротехнического оборудования является комплексным показателем и при ее оценке также используют взвешенную оценку, в частности, среднегеометрическую:

$$\zeta_{\text{надежность}} = \prod_{i=1}^n \xi_i^{k_i}, \quad (6)$$

где ξ_i – показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и др.

На основе экспертных оценок выполняется расчет значений k_i по различным алгоритмам с учетом балльных оценок. Определение k_i аналитическими методами возможно, если отклонения ПКЭЭ описываются аналитической функцией, полученной в результате теоретических выкладок, имитационного моделирования или экспериментальных данных.

Методы организации выборочного контроля ПКЭЭ

При выборочном контроле ПКЭЭ важно соблюдать условия теоремы Муода, которая определяет целесообразность выборочного контроля для ПКЭЭ с учетом заданного закона распределения. Предположим, что имеется некоторая совокупность N выборочных во времени значений ПКЭЭ. При

организации выборочного контроля анализируется усеченная выборка объемом n значений. Введем случайную величину D , характеризующую количество отклонений в совокупной выборке из N отсчетов ПКЭЭ; параметр D принимает значения в диапазоне $i = 0 \dots N$. Каждому численному значению D из совокупной выборки можно поставить в соответствие вероятность $P(D = i)$, где $i \in 0 \dots N$. Тогда математическое ожидание $M[D]$ и дисперсия $\sigma^2[D]$ числа выявленных отклонений ПКЭЭ в совокупной выборке:

$$M[D] = \sum_{i=1}^N i \cdot P(D); \tag{7}$$

$$\sigma^2[D] = \sum_{i=1}^N (i - M[D])^2 \cdot P(D).$$

Определим коэффициент корреляции ρ между числом отклонений d ($d < D$) ПКЭЭ в усеченной выборке объемом n и числом отклонений $(D - d)$ ПКЭЭ в непроверенном остатке.

При этом коэффициент корреляции может быть:

- положительным ($\rho > 0$), если $(\sigma^2[D] / \{M[D] \cdot (1 - M[D]/N)\}) > 1$, или $\sigma^2[D] > \{M[D] \cdot (1 - M[D]/N)\}$;
- отрицательным ($\rho < 0$), если $(\sigma^2[D] / \{M[D] \cdot (1 - M[D]/N)\}) < 1$, или $\sigma^2[D] < \{M[D] \cdot (1 - M[D]/N)\}$;
- равным нулю ($\rho = 0$), если $(\sigma^2[D] / \{M[D] \cdot (1 - M[D]/N)\}) = 1$, или $\sigma^2[D] = \{M[D] \cdot (1 - M[D]/N)\}$.

Если статистическая взаимосвязь между числом отклонений ПКЭЭ в выборке и непроверенном остатке отсутствует (коэффициент корреляции $\rho = 0$) или отрицательная (коэффициент корреляции $\rho < 0$), то проводить выборочный контроль нецелесообразно, так как он не дает дополнительной полезной информации. Выборочный контроль ПКЭЭ имеет смысл, если $\rho > 0$, или $\sigma^2[D] > \{M[D] \cdot (1 - M[D]/N)\}$.

Под статистическим контролем КЭЭ понимается выборочный контроль ПКЭЭ, основанный на

методах математической статистики. В СЭС он может применяться как для установления соответствия на выбранных интервалах договорным условиям поставки электроэнергии, так и для реализации управляющих воздействий с целью введения ПКЭЭ в область нормативных значений. Статистический анализ и контроль ПКЭЭ может быть одноступенчатым, двухступенчатым, многоступенчатым и последовательным. При последовательном анализе требуется минимальное число временных выборочных отсчетов ПКЭЭ для принятия решения о его нахождении в пределах допустимых значений, что позволяет обеспечить его высокое быстродействие.

Пример реализации выборочного контроля по альтернативному признаку с применением последовательного анализа и комплексного ПКЭЭ

Разработка новых способов контроля КЭЭ в промышленных СЭС обусловлена особенностями технологических процессов потребителей, значительным ущербом при отклонениях ПКЭЭ, а также необходимостью реализации управляющих воздействий для восстановления нормальной работы СЭС. Для конкретной точки присоединения потребителя будет характерен собственный набор искажений синусоидальности токов (напряжений), определяемый, в том числе, на основании результатов имитационного моделирования [7].

Имитационное моделирование позволяет учитывать различные режимы работы СЭС, включая ремонтные, выявлять режимы и точки присоединения электроприемников, в которых возможны существенные отклонения ПКЭЭ, требующие принятия мер по восстановлению нормальной работы, а также определять допустимые диапазоны отклонения комплексного ПКЭЭ, и отдельных ПКЭЭ.

Устройство (рис. 2), реализующее способ выборочного контроля КЭЭ, включает в себя после-

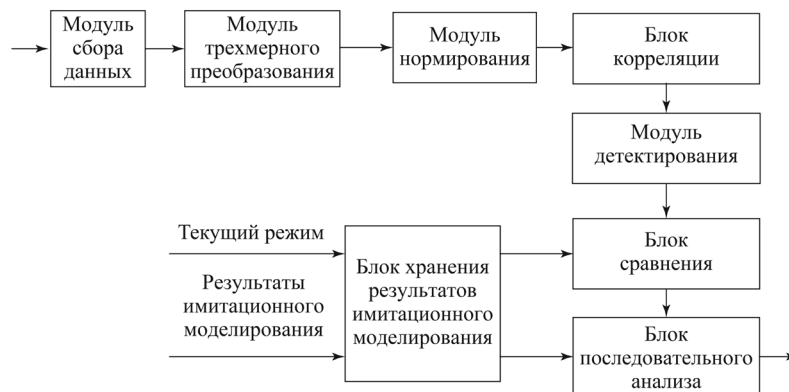


Рис. 2. Структурная схема устройства, реализующего способ выборочного контроля КЭЭ в промышленной СЭС

довательно соединенные модуль сбора данных, модуль трехмерного преобразования, модуль нормировки, блок корреляции, модуль детектирования, блок сравнения, блок последовательного анализа и блок хранения результатов имитационного моделирования.

Для функционирования устройства выполняется предварительное имитационное моделирование, результаты которого вносятся в память блока хранения, и формируется база допустимых отклонений комплексного ПКЭЭ в анализируемых точках присоединения и режимах работы СЭС, а также отдельных ПКЭЭ (наиболее критичных), для проведения выборочного контроля.

Модуль сбора данных устройства предусматривает подключение к каждой фазе трехфазной электрической сети и измерение фазных значений токов и напряжений в точке присоединения. В модуле выполняется аналого-цифровое преобразование и на его выход подаются мгновенные значения фазных токов и напряжений.

В каждый момент времени модуль трехмерного преобразования принимает мгновенные значения фазных токов и/или напряжений $x_a(n)$, $x_b(n)$, $x_c(n)$ (где n – текущее дискретное время), измеренные в точке присоединения. В модуле осуществляется преобразование Кларка, являющееся разновидностью преобразования симметричных составляющих:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha(n) \\ x_\beta(n) \\ x_0(n) \end{bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a(n) \\ x_b(n) \\ x_c(n) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Две первые составляющие, полученные в результате преобразования (8), объединяются для получения комплексного числа, зависящего от дискретного времени и называемого пространственным вектором:

$$\underline{x}(n) = x_\alpha(n) + jx_\beta(n). \quad (9)$$

Этот вектор содержит всю необходимую информацию о СЭС для реализации выборочного контроля ПКЭЭ. Если трехфазная система сбалансирована, то пространственный вектор описывает окружность на комплексной плоскости. Нарушение синусоидальности сигналов токов и напряжений приводит к деформации пространственного вектора, что позволяет количественно определять различные отклонения ПКЭЭ.

Мгновенные значения комплексного вектора

из модуля трехмерного преобразования (рис. 2) поступают на модуль нормировки. В модуле нормировки в скользящем окне данных, включающем, например, N комплексных отсчетов (мгновенных значений) пространственного вектора, эти отсчеты нормируются (приводятся 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 нормируется к рассчитанной энергии.

Далее нормированные совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора поступают в блок корреляции. В этом блоке выполняется расчет комплексного ПКЭЭ, в качестве которого выступает коэффициент корреляции; с его помощью оценивается КЭЭ, так как он характеризует искажения синусоидальности анализируемого сигнала [8], а также нарушение требований когерентности [9], причем, чем больше значение действительной части коэффициента корреляции, тем больше сигналы подобны друг другу по форме. При совпадении сравниваемых комплексных дискретных сигналов коэффициент корреляции максимален и равен их энергии. Поэтому сравнение комплексных дискретных сигналов может осуществляться на основе анализа значений коэффициента корреляции. При этом гарантируется, что максимальное значение действительной части коэффициента корреляции будет получено только при совпадении анализируемого и эталонного комплексных дискретных сигналов по форме. Свойства модуля коэффициента корреляции аналогичны свойствам его действительной части, поэтому при организации контроля КЭЭ может использоваться модуль коэффициента корреляции [10].

Если симметричный трехфазный сигнал тока (напряжения) имеет синусоидальную форму частотой 50 Гц, то совокупность мгновенных значений его пространственного вектора может выступать в виде эталонного комплексного сигнала, относительно которого следует оценивать отклонения ПКЭЭ у совокупности мгновенных значений пространственного вектора анализируемого сигнала. Если 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 комплексного ПКЭЭ при оценке требований КЭЭ в конкретной точке присоединения СЭС. С учетом особенностей электроприемников, подключенных к анализируемой точке сети, при

проведении имитационного моделирования оценим допустимое отклонение модульного значения коэффициента взаимной корреляции между эталонным и анализируемым сигналами пространственного вектора. Это значение может использоваться в качестве уставочного, а его превышение выступать как дискретный признак нарушения допустимого отклонения комплексного ПКЭЭ.

Коэффициент взаимной корреляции пространственного вектора вычисляется в блоке корреляции устройства (рис. 2), в качестве которого может использоваться устройство цифровой фильтрации (цифровой фильтр), если его импульсная характеристика соответствует эталонному сигналу пространственного вектора.

Мгновенные значения комплексного коэффициента взаимной корреляции подаются на модуль детектирования для получения их модульных значений; эти значения с выхода модуля детектирования поступают на первый вход блока сравнения, на вторые входы которого из блока 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 ПКЭЭ.

В блоке хранения результатов имитационного моделирования устройства (рис. 2) учитывается информация о текущем режиме, выраженная, например, в виде номера режима. Такая информация может поступать, например, из SCADA-системы или из системы диспетчерско-технологического управления. Номер режима определяет текущий набор уставочных значений, выдаваемых с выходов блока хранения результатов имитационного моделирования в блок сравнения для анализируемых точек присоединения СЭС. Дополнительно на второй вход блока последовательного анализа с выхода блока хранения результатов имитационного моделирования для каждого режима и точки присоединения выдаются параметры (величины k_1, k_2, a, b – выражение (14)), необходимые для выполнения выборочного контроля ПКЭЭ. С выхода блока сравнения на первый вход блока 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 равно единице,

а контроль комплексного ПКЭЭ сведем к проверке гипотезы о том, что q не превышает некоторого заданного значения q' .

При анализе КЭЭ с применением цифровой обработки сигналов (рис. 2) на заданном выборочном интервале времени имеем большой массив мгновенных значений комплексного ПКЭЭ, последовательно поступающих с выхода модуля детектирования. Предположим, что значение комплексного ПКЭЭ в каждый момент времени может выходить или не выходить за пределы допустимого диапазона значений (дискретный сигнал ξ_n на выходе блока сравнения), на основании чего КЭЭ в заданный момент времени может признаваться соответствующим/несоответствующим установленным нормам в конкретной точке присоединения и режиму работы СЭС. Примем значение $\xi_n = 0$, если в текущий момент времени КЭЭ соответствует нормам, и $\xi_n = 1$ при нарушении требований к КЭЭ. Предположим, что переменная q означает относительное число моментов времени, когда имеют место отклонения комплексного ПКЭЭ.

Применительно к схеме (рис. 2) параметр 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 модуля коэффициента корреляции ниже нормируемого (уставочного) значения для текущего режима функционирования СЭС. Целесообразно задать такое значение q' , чтобы при $q < q'$ принималось решение о соответствии требованиям к КЭЭ на всем выборочном интервале наблюдений, а при $q > q'$ – это соответствие не выполнялось.

Непрерывная проверка совокупности выборочных значений комплексного ПКЭЭ во всех точках присоединения СЭС требует больших финансовых и временных затрат, а порой и нецелесообразна, исходя из схемно-режимных условий. Для организации рационального выборочного контроля КЭЭ необходимо устанавливать риски, характерные для неверного принятия решений.

Учтем, что при $q = q'$ КЭЭ находится на границе допустимого и неважно какое решение будет принято. Если $q > q'$, то следует принимать решение о нарушении требований к КЭЭ, причем с увеличением q увеличивается и степень обоснованности такого решения. Если $q < q'$, то целесообразно считать, что КЭЭ находится в допустимом диапазоне, а степень уверенности при этом увеличивается с уменьшением q .

Если q незначительно отличается от q' , то ошибки при принятии решений относительно КЭЭ невелики. Тогда возможно задание значений q_0 и q_1 ($q_0 < q'$ и $q_1 > q'$); в этом случае решение о ненадлежащем КЭЭ, сопровождающееся

ущербом у потребителя, принимается при $q \geq q_1$, а решение о надлежащем КЭЭ, не приводящем к ущербу – при $q \leq q_0$. При значениях q , находящихся в диапазоне от q_0 до q_1 , никакого решения не принимается.

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

- вероятность классифицировать отклонения ПКЭЭ не должна превышать предварительно заданное значение α , когда $q \leq q_0$;

- вероятность классифицировать отсутствие отклонений ПКЭЭ не должна превышать предварительно заданное значение β , когда $q \geq q_1$.

Следовательно, риск неправильного решения определяется четырьмя параметрами – q_0, q_1, α, β . Выбор этих параметров реализуется статистическими методами (с помощью таблиц, графиков и др.) или на основе результатов имитационного моделирования СЭС в различных схемно-режимных условиях, в том числе при отклонениях ПКЭЭ от нормируемых значений. Воспользуемся выкладками [11], где изложены классические основы последовательной проверки статистических гипотез.

В блоке последовательного анализа реализуется биномиальная схема испытаний, согласно которой по результатам фиксации значения ξ_n осуществляется проверка гипотез [11]:

$$H : q = q_0 \text{ и } H_1 : q = q_1, \quad (10)$$

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

В текущий n -й момент анализа ПКЭЭ имеем случайное значение ξ_n , закон распределения которого соответствует выражению:

$$p(\xi; q) = q^\xi \cdot (1 - q)^{1-\xi}, \quad (11)$$

где ξ принимает значения 0 или 1.

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

$$\eta_n(\xi_1, \dots, \xi_n) = \frac{p(\xi_1; q_1) \cdot p(\xi_2; q_1) \cdot \dots \cdot p(\xi_n; q_1)}{p(\xi_1; q_0) \cdot p(\xi_2; q_0) \cdot \dots \cdot p(\xi_n; q_0)} = \left(\frac{q_1}{q_0}\right)^{Dn} \cdot \left[\frac{(1-q_1)}{(1-q_0)}\right]^{n-Dn}, \quad (12)$$

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

Пусть dn – значение случайной величины Dn ,

тогда область, в которой испытания продолжаются для последовательного критерия Вальда, определяется неравенством:

$$B < \left(\frac{q_1}{q_0}\right)^{dn} \cdot \left[\frac{(1-q_1)}{(1-q_0)}\right]^{n-dn} < A, \quad (13)$$

где $A = \frac{(1-\beta)}{\alpha}$; $B = \frac{\beta}{(1-\alpha)}$; α и β – ошибки первого и второго рода [11].

После несложных математических преобразований выражение (13) может быть приведено к виду:

$$k_1 \cdot n - k_2 \cdot b < dn < k_1 \cdot n + k_2 \cdot a, \quad (14)$$

где $a = \ln A > 0$; $b = -\ln B > 0$;

$$k_2 = \frac{1}{\ln \left[\frac{q_1 \cdot (1-q_0)}{(1-q_1) \cdot q_0} \right]}; \quad k_1 = k_2 \cdot \ln \left[\frac{(1-q_0)}{(1-q_1)} \right]. \quad (15)$$

Последовательные испытания продолжаются при соблюдении условия (14) и прекращаются на том шаге процедуры последовательного анализа комплексного ПКЭЭ, когда нарушается любое из неравенств. Нарушение левого неравенства приводит к принятию гипотезы $H_0: q = q_0$, нарушение правого неравенства – гипотезы $H_1: q = q_1$.

На плоскости наблюдений (n, dn) границы, характеризующие области принятия гипотез, обозначаются прямыми линиями (рис. 3):

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

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

Результаты анализа комплексного ПКЭЭ выражаются в значениях дискретного сигнала на выходе блока последовательного анализа (рис. 2). Появление единичного сигнала на выходе этого блока свидетельствует об отклонении комплексного ПКЭЭ от нормируемых значений, которые могут привести к возникновению ущерба у потребителя, и необходимо принятие мер (реализация управляющих воздействий) по приведению ПКЭЭ в нормативные диапазоны.

В устройстве (рис. 2) реализуется совокупность операций обработки сигналов токов (напряжений), обеспечивающих статистический выборочный контроль, а также учитывается комплексное воздействие совокупности отклонений ПКЭЭ на функционирование конкретной промышленной СЭС потребителя. Планируется применение разработанного устройства в промышленных СЭС

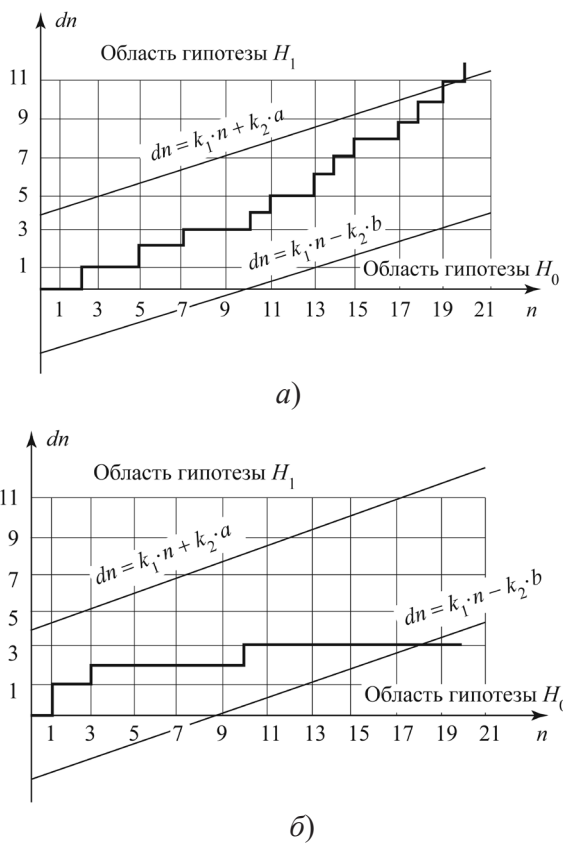


Рис. 3. Процессы принятия решений при последовательном анализе комплексного ПКЭЭ: *a* – принимается гипотеза H_1 ; *b* – принимается гипотеза H_0

и питающих распределительных сетях с последующей их интеграцией в системы автоматического управления качеством электроэнергии.

Выводы

1. Создание систем непрерывного мониторинга ПКЭЭ в большинстве случаев является обоснованным, при этом целесообразно применение статистического выборочного контроля ПКЭЭ для определения их соответствия установленным требованиям.

2. На основе комплексного ПКЭЭ в автоматическом (автоматизированном) режиме могут формироваться управляющие воздействия для введения ПКЭЭ в область нормативных значений.

3. При организации выборочного контроля ПКЭЭ предварительное имитационное моделирование позволяет выявлять режимы и точки присоединения электроприемников, в которых возможны существенные отклонения ПКЭЭ, и определять допустимые диапазоны отклонений комплексного ПКЭЭ.

4. Процедура автоматического последовательного анализа по альтернативному признаку, использованная в разработанном устройстве, реализующем статистический выборочный контроль ПКЭЭ на основе результатов имитационного моделирования, при цифровой обработке сигналов токов (напряжений) обеспечивает высокое быстродействие алгоритма.

Список литературы

1. Hossain E., Tur M.R., Padmanaban S., Ay S., Khan I. Analysis and Mitigation of Power Quality Issues in Distributed Generation Systems Using Custom Power Devices // IEEE Access. 2008. № 6.
2. Won D.J. et al. A new algorithm to locate power-quality event source with improved realization of distributed monitoring scheme // IEEE Transactions on Power Delivery. 2006. Vol. 21. № 3.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 1999.
4. Малахова Ю.Г., Жирнова Е.А., Захарова Н.В. Управление качеством. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014.
5. ГОСТ 32144 – 2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
6. Басовский Л.Е., Протасьев В.Б. Управление качеством М.: ИНФРА-М, 2004.
7. Патент РФ № 2741269. Способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения А.Л. Куликов А.А., Севостьянов, П.В. Илюшин, Г.Я Вагин. // БИ. 2021. № 3.
8. Куликов А.Л., Илюшин П.В., Вагин Г.Я., Севостьянов А.А. О корректировке требований к точности цифровой обработки сигналов токов и напряжений в активных системах промышленного электроснабжения // Изв. РАН. Энергетика. 2021. № 1.
9. Куликов А.Л., Илюшин П.В., Севостьянов А.А. Оценка когерентности сигналов при анализе осциллограмм токов и напряжений промышленной частоты // Электротехника. 2021. № 11.
10. Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Маляренко А.С. и др. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007.
11. Вальд А. Последовательный анализ. М.: Физматгиз. 1960.