

УДК 621.311.1

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ВЫБОРОЧНОМ КОНТРОЛЕ НЕСКОЛЬКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

© 2022 г. А. Л. Куликов¹, А. А. Севостьянов¹, П. В. Илюшин², *¹ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижегород, Россия²ФГБУН Институт энергетических исследований Российской академии наук, Москва, Россия
*e-mail: ilyushin.pv@mail.ru

Поступила в редакцию 04.10.2021 г.

После доработки 10.12.2021 г.

Принята к публикации 16.12.2021 г.

Проведен анализ особенностей современных систем электроснабжения и возрастающих требований потребителей к показателям качества электрической энергии (ПКЭЭ) в точке присоединения электроустановок (электроприемников) к сетям внешнего электроснабжения электросетевых компаний. Значительные отклонения ПКЭЭ приводят к существенным ущербам у потребителей из-за отключений электротехнического оборудования технологическими защитами вследствие перегрева, повышенного износа отдельных элементов технологических линий, что обуславливает необходимость внедрения систем непрерывного мониторинга или выборочного контроля ПКЭЭ. Обоснована целесообразность перехода от контроля совокупности отдельных ПКЭЭ к обобщенному (комплексному) ПКЭЭ с организацией одновременного контроля по нескольким параметрам. Доказана эффективность совместного использования результатов имитационного моделирования и данных от систем мониторинга ПКЭЭ для проведения детального анализа ПКЭЭ в системах электроснабжения с применением процедуры выборочного контроля. Приведен пример процесса последовательного принятия решения при анализе обобщенного ПКЭЭ на основе процедуры последовательного анализа Вальда, позволяющий обеспечить адаптацию процедуры мониторинга ПКЭЭ к особенностям конкретной системы электроснабжения. Представлена структурная схема разработанного устройства, реализующего процедуру выборочного контроля обобщенного ПКЭЭ. Приведен подход к определению среднего числа данных выборочного контроля, необходимых для принятия решения о качестве электрической энергии при реализации процедуры последовательного анализа.

Ключевые слова: система электроснабжения, выборочный контроль, обобщенный показатель качества электрической энергии, имитационное моделирование, последовательный анализ Вальда

DOI: 10.31857/S0002331022020042

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы электроснабжения (СЭС) имеют тенденцию к усложнению за счет интеграции в них различных видов генерирующих установок (ГУ) объектов распределенной генерации (РГ), в том числе на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), систем накопления электроэнергии и нелинейной нагрузки с элемен-

тами силовой электроники (устройства плавного пуска, частотно-регулируемый привод, источники бесперебойного питания и др.). При этом СЭС должны обеспечивать надежное электроснабжение электроприемников потребителей как в установившихся (квазиустановившихся) режимах, так и в переходных процессах [1–3].

При широком внедрении объектов ВИЭ, имеющих стохастический характер выработки электроэнергии, а также учитывая то, что включение/отключение мощных электроприемников осуществляется в соответствии с текущими потребностями потребителей (например, определяется условиями технологического цикла), в СЭС фиксируется значительное увеличение амплитуды случайных флуктуаций режимных параметров [4].

Кроме того, в СЭС с объектами РГ скорость протекания электромеханических переходных процессов при различных возмущениях (КЗ, значительные набросы/сбросы нагрузки и др.) в островном режиме работы в 2–8 раз выше, что обусловлено малыми значениями механических постоянных инерции ГУ, а также низкой скоростью набора нагрузки ГУ на базе двигателей внутреннего сгорания с турбонаддувом.

Применяемое в современных СЭС электротехническое оборудование с элементами силовой электроники имеет нелинейные характеристики, что приводит к длительным переходным процессам со значительными отклонениями показателей качества электрической энергии (ПКЭЭ), особенно в островном режиме работы. Это связано с тем, что в режимах с нагрузкой указанного оборудования не более 30% (например, при малых величинах нагрузки источников бесперебойного питания) коэффициент гармонических искажений по току (THDi) существенно увеличивается, и чем она меньше, тем THDi больше.

Значения THDi и последствия его роста в СЭС при этом будут следующие:

- $\text{THDi} < 0.1$ – нормальная обстановка, отсутствие сбоев в работе электротехнического оборудования;
- $0.1 < \text{THDi} < 0.5$ – значительное загрязнение СЭС гармоническими составляющими с опасностью повышения температуры электротехнического оборудования, что обуславливает необходимость перехода на большие сечения кабельных линий электропередачи, а также применение ГУ объектов РГ и резервных источников электропитания большей мощности;
- $\text{THDi} > 0.5$ – большая степень загрязнения СЭС гармоническими составляющими, при которой возможны отказы в работе и отключения электротехнического оборудования вследствие перегрева, что требует установки фильтро-компенсирующих устройств.

Следует отметить, что значительные отклонения ПКЭЭ от нормативных значений фиксируются чувствительными к нарушениям синусоидальности токов и напряжений ответственными электроприемниками промышленных потребителей – современными технологическими линиями, вызывая повышенный износ их элементов и приводя к отключениям устройствами технологическими защитами [5–7].

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость организации систем мониторинга ПКЭЭ в СЭС, которые позволяют:

- определять в режиме реального времени текущие условия функционирования СЭС;
- осуществлять непрерывную автоматизированную регистрацию и диагностику отклонений ПКЭЭ от нормативных значений;
- выявлять участки (зоны) усиленного контроля за отклонениями ПКЭЭ, которые могут привести к существенным ущербам у потребителей;
- идентифицировать источники искажений ПКЭЭ и оперативно реализовывать организационно-технические мероприятия по приведению ПКЭЭ к нормативным значениям;

– производить балансирование нагрузки для компенсации гармонических составляющих, сформированных электротехническим оборудованием с элементами силовой электроники [8, 9].

Внедрение систем мониторинга ПКЭЭ соответствует положениям концепции интеллектуализации современных СЭС, существенно расширяя возможности по управлению электрическими режимами и качеством электрической энергии, что способствует повышению надежности электроснабжения потребителей [10].

Целью статьи является обоснование целесообразности перехода в СЭС от контроля совокупности отдельных ПКЭЭ к обобщенному ПКЭЭ с организацией одновременного контроля по нескольким показателям, а также эффективности совместного использования результатов имитационного моделирования и данных от систем мониторинга ПКЭЭ для проведения детального анализа ПКЭЭ с применением процедуры выборочного контроля.

О ПЕРЕХОДЕ К ОБОБЩЕННОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Введенная в России нормативно-техническими документами (НТД) система контроля ПКЭЭ определяет лишь состав и допустимые диапазоны отклонений отдельных показателей [11]. На практике имеет место комплексное (интегрированное) воздействие ПКЭЭ на электроустановки (электроприемники) потребителей. При этом искажения токов и напряжений в результате совокупности отклонений ПКЭЭ, находящихся на границе области допустимых значений, могут вызвать серьезные негативные последствия у потребителей.

При проведении анализа качества электрической энергии необходимо решить следующие задачи:

- сформировать обобщенный ПКЭЭ, с помощью которого возможна оценка комплексного воздействия совокупности отклонений ПКЭЭ на функционирование электроприемников конкретного потребителя;
- определить диапазоны допустимых отклонений обобщенного ПКЭЭ, в пределах которых у конкретных потребителей не возникает ущербов. Данная задача может быть решена с использованием данных имитационного моделирования для различных схемно-режимных ситуаций и условий функционирования рассматриваемого потребителя, в том числе в основных ремонтных схемах сетей внешнего электроснабжения;
- разработать процедуру выборочного контроля ПКЭЭ на основе обобщенного ПКЭЭ для последующего принятия решений по реализации организационно-технических мероприятий с целью введения обобщенного ПКЭЭ в допустимый диапазон.

Следует отметить, что отклонения ПКЭЭ в точке присоединения подразделяются на продолжительные изменения и случайные события. Последние, как правило, не оказывают существенного влияния на функционирование электроприемников потребителей ввиду их кратковременности и не требуют реализации организационно-технических мероприятий с целью введения ПКЭЭ в допустимый диапазон [11].

Для оценки параметров токов и напряжений в различных цифровых устройствах, включая приборы контроля ПКЭЭ, выделяются короткие временные интервалы (скользящее окно данных), составляющие, например, один период промышленной частоты [12, 13]. Требуемой точности оценки при определении параметров искажающих гармонических составляющих на таких коротких временных интервалах не удастся достичь. Вследствие чего результаты вычислений некоторых ПКЭЭ будут неточными и неадекватными фактической ситуации с искажениями токов и напряжений в СЭС [14].

Установление соответствия ПКЭЭ требованиям НТД (ГОСТ, технических условий на электроприемники потребителей и др.) должно осуществляться при контроле в процессе мониторинга ПКЭЭ. В зависимости от особенностей СЭС, а также финан-

совых возможностей потребителей и электросетевых компаний может быть организован как непрерывный, так и выборочный контроль ПКЭЭ. При непрерывном контроле измерения и вычисления всех ПКЭЭ осуществляются в каждый момент времени во всех точках присоединения потребителей к сетям внешнего электроснабжения. С учетом экономической целесообразности такая форма контроля в большинстве случаев является неприемлемой. При выборочном контроле оцениваются ПКЭЭ на отдельных интервалах времени в заранее определенных точках контроля, с расчетом только тех ПКЭЭ, которые являются критичными для конкретного потребителя с учетом его технологических особенностей.

Выборочный контроль ПКЭЭ целесообразно организовать с использованием специальных выборочных процедур математической статистики [15]. В процессе наблюдения на ограниченном (коротком) интервале времени будет формироваться вывод о соблюдении требований НТД к ПКЭЭ на временном периоде до следующего выборочного контроля.

Предпочтительна организация контроля ПКЭЭ по количественному признаку [16]. При таком контроле в точках присоединения электроприемников потребителей по совокупности рассчитанных ПКЭЭ можно установить справедливость альтернативных гипотез о соответствии или несоответствии ПКЭЭ требованиям НТД [11].

Примем, что качество электрической энергии характеризуется k независимыми показателями. Тогда результат контроля ПКЭЭ определяется k -мерным вектором-столбцом $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_k)^T$, в котором каждая компонента x_j является бинарной и имеет значение 1 в условиях недопустимого отклонения ПКЭЭ по j -ому показателю, и 0 — в условиях допустимых отклонений. Задача состоит в оценке качества электрической энергии по результатам выборочного контроля.

Проведем анализ методов последовательного выборочного контроля качества электрической энергии по числу выявленных отклонений отдельных показателей.

МЕТОДЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВЫБОРОЧНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Выборочный контроль качества электрической энергии произведем на интервале, включающем N отсчетов сигналов токов (напряжений). Обозначим через m_j ($0 \leq m_j \leq N$, $j = 1, 2, \dots, k$) число отклонений по j -ому ПКЭЭ и зададим случайный k -мерный вектор $\mathbf{m} = (m_1, \dots, m_j, \dots, m_k)$. Пусть компонента m_j распределена по биномиальному закону с параметрами n и q_j , где q_j — вероятность возникновения отклонения показателя m_j от допустимого значения. При условии независимости отдельных ПКЭЭ закон распределения вектора $\mathbf{m}$ принимает вид

$$P_n(\mathbf{m}) = \prod_{j=1}^k C_n^{m_j} q_j^{m_j} (1 - q_j)^{n-m_j}. \quad (1)$$

Оценку вероятностей q_j для конкретной СЭС можно получить по результатам имитационного моделирования или мониторинга ПКЭЭ в различных схемно-режимных условиях функционирования СЭС на длительном временном интервале.

Введем обобщенный (комплексный) ПКЭЭ в виде

$$\xi = \sum_{j=1}^k c_j m_j, \quad (2)$$

где $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_j, \dots, c_k)^T$ — вектор-столбец весовых коэффициентов, определяющий соотношения ущербов от нарушений качества электрической энергии при отклонении отдельных показателей.

В ряде работ (например, [17]) предлагается группировать контролируемые показатели при выборе весовых коэффициентов c_j ($j = 1, 2, \dots, k$), исходя из величины ущерба, связанного с отклонением отдельных показателей (группы), с присвоением веса c_j . Группировка показателей может быть осуществлена с применением метода экспертных оценок.

Поскольку в выражении (2) каждая компонента вектора $\mathbf{m}$ распределена по биномиальному закону с независимой от n вероятностью, то случайная переменная ξ , как линейная комбинация асимптотически нормальных величин m_j ($j = 1, 2, \dots, k$), также имеет асимптотически нормальное распределение с математическим ожиданием m_ξ и дисперсией σ_ξ^2

$$m_\xi = n \sum_{j=1}^k c_j q_j; \quad \sigma_\xi^2 = n \sum_{j=1}^k c_j q_j (1 - q_j). \quad (3)$$

Степень приближения распределения ξ к нормальному закону во многом зависит от вектора $\mathbf{c}$ и численных значений вероятностей q_j .

Выполним проверку гипотезы, что среднее значение нормально распределенной величины показателя КЭЭ с известной дисперсией не превышает заданной величины.

Предположим, что ξ – случайная величина ПКЭЭ с изменяющимся во времени средним значением m_ξ и известной дисперсией σ_ξ^2 , определяемых текущим режимом работы СЭС и точностными характеристиками производимых измерений токов и напряжений методами цифровой обработки сигналов.

Относительно выбранного обобщенного ПКЭЭ ξ решается следующая статистическая задача: проверяется гипотеза о том, что m_ξ меньше или равно заданному уставочному значению $m_{\xi \text{ уст}}$.

Пусть имеется совокупность N последовательных мгновенных выборочных значений одного из ПКЭЭ на анализируемом интервале времени. Принимается, что соотношение между анализируемым интервалом времени относительно интервала дискретизации при цифровой обработке сигналов токов и напряжений является очень большим. Фиксация отклонений совокупности ПКЭЭ от нормативных значений осуществляется по оценке математического ожидания m_ξ случайной величины ξ [18]. В каждый момент времени значения случайной величины ξ в общем случае могут отличаться друг от друга, но дисперсия отклонений σ_ξ^2 является известной величиной, а математическое ожидание (среднее значение) m_ξ на анализируемом временном интервале неизвестно.

Для иллюстрации логики принятия решения по обобщенному ПКЭЭ условимся, что предпочтительно иметь меньшее значение m_ξ (например, меньшее значение величины отклонения от нормативного значения). Зададим уставочное значение $m_{\xi \text{ уст}}$ такое, что при $m_\xi < m_{\xi \text{ уст}}$ отклонения обобщенного ПКЭЭ будут считаться допустимыми, а при $m_\xi > m_{\xi \text{ уст}}$ будет приниматься решение о несоответствии обобщенного ПКЭЭ нормативному значению. При $m_\xi = m_{\xi \text{ уст}}$ будет иметь место неопределенность в процессе принятия решения о соответствии ПКЭЭ требованиям НТД. Далее, если m_ξ увеличивается (уменьшается) в ходе проведения последовательного выборочного контроля, то соответственно уменьшается (увеличивается) степень уверенности в качестве электрической энергии для анализируемого режима СЭС.

При проведении последовательного выборочного контроля устанавливаются такие значения $m_{\xi 0}$ и $m_{\xi 1}$ ($m_{\xi 0} < m_{\xi \text{ уст}}$ и $m_{\xi 1} > m_{\xi \text{ уст}}$), при которых решение о соответствии обобщенного ПКЭЭ нормативному значению рассматривается с учетом рисков

(ущербов). Если $m_\xi \leq m_{\xi_0}$, то ошибочному решению о несоответствии качества электрической энергии характерен так называемый “риск поставщика” (электросетевой компании), а принятие решения о соответствии качества электрической энергии, если $m_\xi > m_{\xi_1}$, характерно “риску потребителя” [19, 20]. Таким образом, область соответствия обобщенного ПКЭЭ нормативному значению определяется совокупностью величин m_ξ , для которых $m_\xi \leq m_{\xi_0}$, а область несоответствия — совокупностью величин m_ξ , для которых $m_\xi \geq m_{\xi_1}$. Область, для которой $m_\xi \in]m_{\xi_0}; m_{\xi_1}[$, является областью неопределенности.

Риски, свойственные выбору m_{ξ_0} и m_{ξ_1} , соответствуют величинам α и β и характеризуются вероятностями неправильных решений. Применение последовательного критерия отношения вероятностей при реализации процедуры принятия решения приводит к следующим соотношениям.

Пусть $\xi_1, \xi_2, \dots$ последовательность мгновенных значений наблюдаемой величины ξ , характеризующей качество электрической энергии. Плотность вероятности выборки $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$, если $m_\xi = m_{\xi_0}$, соответствует выражению

$$p_0(m) = (2\pi\sigma^2)^{-m/2} \exp \left\{ -\sum_{i=1}^m (\xi_i - m_{\xi_0})^2 / (2\sigma^2) \right\}, \quad (4)$$

и, если $m_\xi = m_{\xi_1}$, то выражению

$$p_1(m) = (2\pi\sigma^2)^{-m/2} \exp \left\{ -\sum_{i=1}^m (\xi_i - m_{\xi_1})^2 / (2\sigma^2) \right\}. \quad (5)$$

В ходе процедуры последовательного анализа на каждом шаге вычисляется отношение правдоподобия, определяемое равенством

$$\eta(m) = p_1(m)/p_0(m). \quad (6)$$

Пошаговые вычисления реализуются до тех пор, пока соблюдаются условия

$$B < \eta(m) = \exp \left\{ -\sum_{i=1}^m (\xi_i - m_{\xi_1})^2 / (2\sigma^2) \right\} / \exp \left\{ -\sum_{i=1}^m (\xi_i - m_{\xi_0})^2 / (2\sigma^2) \right\} < A. \quad (7)$$

Процедура последовательного анализа заканчивается принятием решения об отклонении обобщенного ПКЭЭ от нормируемого значения, если

$$\eta(m) = \exp \left\{ -\sum_{i=1}^m (\xi_i - m_{\xi_1})^2 / (2\sigma^2) \right\} / \exp \left\{ -\sum_{i=1}^m (\xi_i - m_{\xi_0})^2 / (2\sigma^2) \right\} \geq A, \quad (8)$$

о принадлежности значения обобщенного ПКЭЭ допустимому диапазону отклонений, если

$$\eta(m) = \exp \left\{ -\sum_{i=1}^m (\xi_i - m_{\xi_1})^2 / (2\sigma^2) \right\} / \exp \left\{ -\sum_{i=1}^m (\xi_i - m_{\xi_0})^2 / (2\sigma^2) \right\} \leq B. \quad (9)$$

Уставочные значения A и B определяются выражениями

$$A = (1 - \beta)/\alpha; \quad B = \beta/(1 - \alpha). \quad (10)$$

Логарифмируя и преобразуя выражения (7)–(9), получим

$$\ln [\beta/(1 - \alpha)] < \left[(m_{\xi_1} - m_{\xi_0})/\sigma^2 \right] \sum_{i=1}^m \xi_i + m(m_{\xi_0}^2 - m_{\xi_1}^2)/(2\sigma^2) < \ln [(1 - \beta)/\alpha], \quad (11)$$

$$\left[(m_{\xi_1} - m_{\xi_0})/\sigma^2 \right] \sum_{i=1}^m \xi_i + m(m_{\xi_0}^2 - m_{\xi_1}^2)/(2\sigma^2) \leq \ln[\beta/(1-\alpha)], \quad (12)$$

$$\left[(m_{\xi_1} - m_{\xi_0})/\sigma^2 \right] \sum_{i=1}^m \xi_i + m(m_{\xi_0}^2 - m_{\xi_1}^2)/(2\sigma^2) \geq \ln[\beta/(1-\alpha)]. \quad (13)$$

Добавляя в обе части неравенств слагаемое $m(m_{\xi_0}^2 - m_{\xi_1}^2)/(2\sigma^2)$ и разделив на $(m_{\xi_1} - m_{\xi_0})/\sigma^2$, приходим к соотношениям

$$\begin{aligned} [(\sigma^2/(m_{\xi_1} - m_{\xi_0})) \ln[\beta/(1-\alpha)] + m(m_{\xi_0} + m_{\xi_1})/2] < \sum_{i=1}^m \xi_i < [(\sigma^2/(m_{\xi_1} - m_{\xi_0})) \times \\ \times \ln[(1-\beta)/\alpha] + m(m_{\xi_0} + m_{\xi_1})/2, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^m \xi_i < [(\sigma^2/(m_{\xi_1} - m_{\xi_0})) \ln[\beta/(1-\alpha)] + m(m_{\xi_0} + m_{\xi_1})/2, \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^m \xi_i < [(\sigma^2/(m_{\xi_1} - m_{\xi_0})) \ln[(1-\beta)/\alpha] + m(m_{\xi_0} + m_{\xi_1})/2. \quad (16)$$

Неравенства (14)–(16) позволяют реализовать контроль обобщенного ПКЭЭ с помощью “приемочных” чисел. Для каждого шага m процедуры последовательного анализа рассчитывается “приемочное” число по выражению

$$a(m) = [(\sigma^2/(m_{\xi_1} - m_{\xi_0})) \ln[\beta/(1-\alpha)] + m(m_{\xi_0} + m_{\xi_1})/2 \quad (17)$$

и “браковочное” число по выражению

$$b(m) = [(\sigma^2/(m_{\xi_1} - m_{\xi_0})) \ln[(1-\beta)/\alpha] + m(m_{\xi_0} + m_{\xi_1})/2. \quad (18)$$

Числа (зависимости $a(m)$, $b(m)$) вычисляются заблаговременно и используются в качестве уставочных значений. Процедура последовательного анализа выполняется пока соблюдаются неравенства

$$a(m) < \sum_{i=1}^m \xi_i < b(m). \quad (19)$$

Когда сумма $\sum_{i=1}^m \xi_i$ выходит за пределы интервала $]a(m), b(m)[$, принимается решение относительно допустимости или недопустимости отклонения обобщенного ПКЭЭ.

Приведем пример организации выборочного контроля обобщенного ПКЭЭ в СЭС с учетом весовых коэффициентов для отдельных показателей.

Пример: примем, что с учетом весовых коэффициентов отдельных показателей обобщенного ПКЭЭ, математические ожидания m_{ξ_0} и m_{ξ_1} обобщенного ПКЭЭ ξ принимают значения $m_{\xi_0} = 130$, $m_{\xi_1} = 155$. Значение дисперсии ξ при нормальном законе распределения равно $\sigma^2 = 225$. Зададим значения $\alpha = 0.01$, а $\beta = 0.03$. При этом значения приемочного и браковочного чисел определим по выражениям

$$a(m) = [225/(155 - 130)] \ln[0.03/(1 - 0.01)] + m(130 + 155)/2 = 142.5m - 87.5;$$

$$b(m) = [225/(155 - 130)] \ln[(1 - 0.03)/0.01] + m(130 + 155)/2 = 142.5m + 114.37.$$

Пусть имеются последовательные выборочные временные отсчеты переменной ξ , значения которой приведены в табл. 1. В табл. 1 также включены изменяющиеся от шага к шагу процедуры последовательного анализа переменные величины $\sum_{i=1}^m \xi_i$, $a(m)$ и $b(m)$.

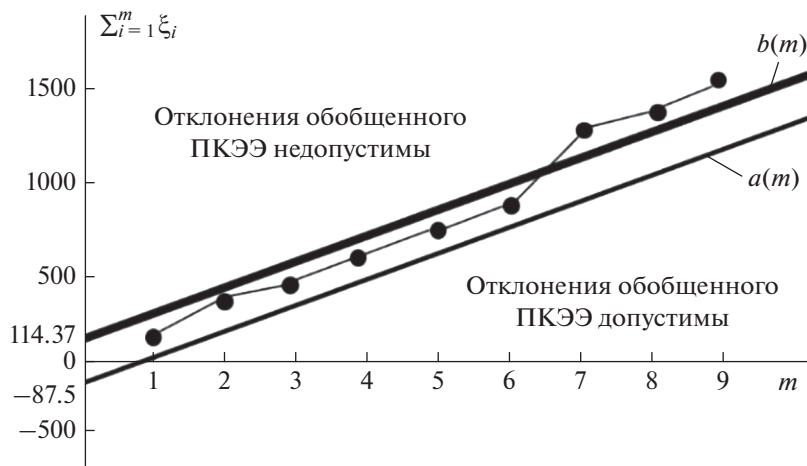


Рис. 1. Процесс последовательного принятия решения относительно отклонений обобщенного ПКЭЭ.

На рис. 1 проиллюстрирован процесс последовательного принятия решения при анализе обобщенного ПКЭЭ.

На графике, представленном на рис. 1, откладываются точки $(m, \sum_{i=1}^m \xi_i)$, характеризующие процесс принятия решения. Коэффициент s , определяющий угол наклона уставочных границ $a(m)$ и $b(m)$, соответствует выражению

$$s = (m_{\xi 0} + m_{\xi 1})/2. \quad (20)$$

Уставочные границы смещены друг относительно друга на величину

$$[(\sigma^2/(m_{\xi 1} - m_{\xi 0}))\{\ln[(1 - \beta)/\alpha] - \ln[\beta/(1 - \alpha)]\}]. \quad (21)$$

Область между уставочными границами — область неопределенности обуславливает необходимость продолжения процедуры выборочного контроля обобщенного ПКЭЭ. Анализ рис. 1 показывает, что процесс последовательного анализа заканчивается на шаге $m = 7$, когда принимается однозначное решение о несоответствии обобщенного ПКЭЭ установленному нормативному значению.

Рассмотрим пример реализации устройства анализа качества электрической энергии с выборочным контролем обобщенного ПКЭЭ.

Таблица 1. Значения переменных, используемых в процедуре последовательного принятия решения относительно отклонений обобщенного ПКЭЭ

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ξ	149	151	154	155	148	160	156	154	150
$\sum_{i=1}^m \xi_i$	149	300	454	609	757	917	1123	1287	1437
$a(m)$	55	197.5	340	482.5	625	767.5	910	1052.5	1195
$b(m)$	256.9	399.4	541.9	684.4	826.9	969.4	1111.9	1254.4	1396.9

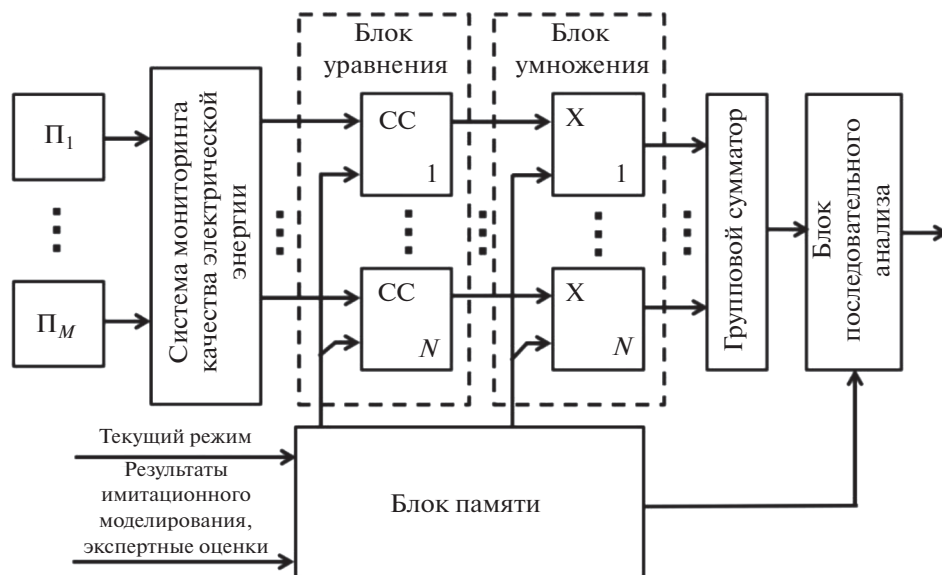


Рис. 2. Структурная схема устройства, реализующего процедуру выборочного контроля обобщенного ПКЭЭ.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ УСТРОЙСТВА АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Для реализации процедуры выборочного контроля обобщенного ПКЭЭ выполняется предварительное имитационное моделирование с целью формирования базы данных допустимых отклонений обобщенного ПКЭЭ в анализируемых точках присоединения электроприемников потребителей для различных режимов функционирования СЭС [21, 22]. Результаты имитационного моделирования вносятся в блок памяти устройства анализа качества электрической энергии, как показано на рис. 2. Дополнительно в блок памяти поступает информация о возможных ущербах потребителей для каждой конкретной точки присоединения СЭС к сети внешнего электроснабжения, сформированная либо по результатам имитационного моделирования, либо путем экспертных оценок, с учетом отклонений каждого отдельного ПКЭЭ [23].

На рис. 2 приведен пример структурной схемы устройства, реализующего процедуру выборочного контроля обобщенного ПКЭЭ с применением последовательного анализа.

Устройство, реализующее процедуру выборочного контроля обобщенного ПКЭЭ (рис. 2), включает в себя систему мониторинга качества электрической энергии, которая подключена к приборам контроля качества электрической энергии ($P_1 \dots P_M$); блок сравнения, включающий схемы сравнения ($CC_1 \dots CC_N$) для каждого из ПКЭЭ; блок умножения, состоящий из N умножителей для каждого из ПКЭЭ; групповой сумматор; блок последовательного анализа и блок памяти.

В устройстве, реализующем процедуру выборочного контроля обобщенного ПКЭЭ (рис. 2), совокупность операций обработки (вычислений) осуществляется следующим образом. В каждый выбранный момент времени из системы мониторинга качества электрической энергии на входы схем сравнения поступают вычисленные значения ПКЭЭ. На другие входы схем сравнения из блока памяти поступают нормируемые значения ПКЭЭ, вычисленные для текущего режима СЭС. По результатам сравнения,

выполняемом в блоке сравнения, формируется дискретный вектор отклонений, компоненты которого почленно умножаются на соответствующие весовые коэффициенты, входящие в состав вектора-столбца $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_j, \dots, c_N)^T$, определяющие величины ущербов при нарушениях качества электрической энергии по отдельным параметрам.

Групповой сумматор предназначен для формирования обобщенного ПКЭЭ, согласно выражению (2), и с его выхода выборочные значения ξ_j поступают на вход блока последовательного анализа. На другой вход блока последовательного анализа поступают массивы значений приемочных $a(m)$ и браковочных $b(m)$ чисел, компоненты которых соответствуют уставочным значениям для каждого шага процедуры последовательного анализа. На рис. 1 проиллюстрирован процесс принятия решения при последовательном анализе с помощью обобщенного ПКЭЭ, где процесс последовательного анализа заканчивается принятием гипотезы о недопустимом отклонении обобщенного ПКЭЭ.

В блок памяти устройства (рис. 2), реализующего процедуру выборочного контроля обобщенного ПКЭЭ, поступает информация о текущем режиме СЭС (положения коммутационных аппаратов, режимные параметры и др.), где происходит его распознавание с присвоением номера. Такая информация может поступать, например, из SCADA-системы или системы диспетчерско-технологического управления (оперативно-информационного комплекса). В блоке памяти для соответствующего номера режима из архива выбирается набор нормируемых значений ПКЭЭ – весовые коэффициенты $c_1, \dots, c_j, \dots, c_N$ и текущий набор уставочных значений $a(m), b(m)$, выдаваемые с выходов блока памяти в блоки сравнения, умножения и последовательного анализа для анализа качества электрической энергии в точках присоединения потребителей к сети внешнего электроснабжения. Наряду с информацией о текущем режиме перед проведением анализа качества электрической энергии на вход блока памяти подаются данные имитационного моделирования, экспертные оценки и другая информация необходимая для функционирования устройства (рис. 2).

Результаты выборочного контроля обобщенного ПКЭЭ представляются в виде дискретного сигнала на выходе блока последовательного анализа. Появление единичного сигнала на выходе этого блока свидетельствует об отклонении обобщенного ПКЭЭ от нормируемого значения, что может привести к возникновению ущерба у потребителя. Следовательно, требуется реализация организационно-технических мероприятий с целью введения обобщенного ПКЭЭ в допустимый диапазон.

Рассмотрим подход к определению среднего числа данных выборочного контроля, необходимых для принятия решения о качестве электрической энергии при реализации процедуры последовательного анализа по обобщенному ПКЭЭ.

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СРЕДНЕГО ЧИСЛА ВЫБОРОЧНОГО КОНТРОЛЯ

Для определения математического ожидания числа данных выборочного контроля (объема выборки) в виде значений обобщенного ПКЭЭ воспользуемся математическими выкладками, полученными в [24]. Применительно к рассматриваемой задаче, вероятность $P(m_\xi)$ того, что процедура последовательного анализа закончится принятием решения о соответствии обобщенного ПКЭЭ нормируемому значению, когда m_ξ – истинное среднее значение, определяется равенством

$$P(m_\xi) = \left\{ [(1 - \beta)/\alpha]^h - 1 \right\} / \left\{ [(1 - \beta)/\alpha]^h - [\beta/(1 - \alpha)]^h \right\}, \quad (22)$$

где $h = (m_{\xi_1} + m_{\xi_0} - 2m_\xi) / (m_{\xi_1} - m_{\xi_0})$.

Вероятностную зависимость $P(m_\xi)$ называют оперативной характеристикой последовательного критерия Вальда. Поскольку $P(m_\xi)$ возрастающая функция относительно h , а h – убывающая функция m_ξ , то $P(m_\xi)$ обладает убывающей зависимостью от m_ξ .

Выражение для определения среднего числа n данных выборочного контроля для процедуры последовательного анализа, связанной с анализом качества электрической энергии и применением обобщенного ПКЭЭ, представляется в виде следующего равенства [24]

$$M(n, m_\xi) = \left\{ 2\sigma^2 P(m_\xi) \ln [\beta/(1-\alpha)] + [1 - P(m_\xi)] \ln [(1-\beta)/\alpha] \right\} / \left\{ m_{\xi 0}^2 - m_{\xi 1}^2 + 2(m_{\xi 1} - m_{\xi 0})m_\xi \right\}. \quad (23)$$

Как правило, представляет интерес расчет значений оперативной характеристики $P(m_\xi)$ для особых значений из множества $m_\xi = \{-\infty; m_{\xi 0}; (m_{\xi 0} + m_{\xi 1})/2; m_{\xi 1}; +\infty\}$, при этом

$$\begin{aligned} P(m_\xi = -\infty) &= 1; & P(m_\xi = m_{\xi 0}) &= 1 - \alpha; \\ P[m_\xi = (m_{\xi 0} + m_{\xi 1})/2] &= \{\ln[(1-\beta)/\alpha]\} / \{\ln[(1-\beta)/\alpha] - \ln[\beta/(1-\alpha)]\}; \\ P(m_\xi = m_{\xi 1}) &= \beta; & P(m_\xi = +\infty) &= 0. \end{aligned}$$

При $m_\xi = (m_{\xi 0} + m_{\xi 1})/2$ правая часть выражения (23) соответствует неопределенности 0/0, а математическое ожидание необходимого числа данных выборочного контроля для процедуры последовательного анализа составляет [24]

$$M[n, m_\xi = (m_{\xi 0} + m_{\xi 1})/2] = \left\{ -\ln [\beta/(1-\alpha)] \ln [(1-\beta)/\alpha] \sigma^2 \right\} / (m_{\xi 1} - m_{\xi 0})^2. \quad (24)$$

С учетом ранее рассмотренных условий задачи произведем расчет значения (по выражению (24)) необходимого среднего числа данных выборочного контроля для процедуры последовательного анализа, когда $m_\xi = (m_{\xi 0} + m_{\xi 1})/2$

$$M[n] = \{-\ln[0.03/(1-0.01)]\ln[(1-0.03)/0.01] \times 225\} / (155 - 130)^2 \approx 6.$$

Таким образом, для организации выборочного контроля с процедурой последовательного анализа обобщенного ПКЭЭ в заданной точке присоединения электроприемников потребителя, необходимо в среднем получить не менее шести результатов выборочного контроля.

ВЫВОДЫ

В условиях, когда современные системы электроснабжения имеют тенденцию к усложнению, а потребители становятся более чувствительны к отклонениям показателей качества электроэнергии, необходимо обеспечивать надежное электроснабжение потребителей как в квазиустановившихся режимах, так и в переходных процессах.

Целесообразно внедрение автоматизированных систем мониторинга показателей качества электрической энергии с применением статистической обработки данных и формированием обобщенного показателя качества электрической энергии.

Учитывая, что внедрение непрерывного контроля показателей качества электрической энергии в большинстве случаев экономически нецелесообразно, то реализация выборочного контроля на отдельных интервалах времени, в заранее определенных точках контроля, с расчетом только тех показателей, которые являются критичными для конкретного потребителя, с учетом его технологических особенностей, является оправданной.

При работе системы электроснабжения в квазиустановившихся режимах перспективна организация выборочного контроля обобщенного показателя качества электрической энергии на основе процедуры последовательного анализа Вальда.

Совместное использование результатов имитационного моделирования, параметров текущего режима и данных выборочного контроля от системы мониторинга показателей качества электрической энергии с применением процедуры последовательного анализа Вальда позволяет обеспечить адаптацию процедуры мониторинга к особенностям конкретной системы электроснабжения.

Реализация предложенного подхода позволяет обеспечить надежное электроснабжение электроустановок (электроприемников) потребителей и предотвратить ущербы за счет своевременной реализации организационно-технических мероприятий при отклонении обобщенного показателя качества электроэнергии за пределы нормируемого значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воропай Н.И.* Надежность систем электроснабжения: Учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. Новосибирск: Наука, 2015. 208 с.
2. *Воропай Н.И., Суслов К.В.* Задачи обоснования развития активных систем электроснабжения // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 2–6.
3. *Есяков С.Я., Лунин К.А., Стенников В.А., Воропай Н.И., Редько И.Я., Баринев В.А.* Трансформация электроэнергетических систем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 4. С. 134–141.
4. *Илюшин П.В.* Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети: монография // Библиотечка электротехника. 2020. № 8. С. 1–116.
5. *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.
6. *Воротницкий В.Э.* Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в распределительных электрических сетях нового технологического уклада // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 4(67). С. 88–96.
7. *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 // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2021. № 1. С. 26–38.
8. ГОСТ 33073-2014 “Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения”. М.: Стандартинформ, 2015. 41 с.
9. *Воротницкий В.Э., Дементьев Ю.А., Лазарев Г.Б., Шакарян Ю.Г.* Организация комплексного процесса управления качеством электроэнергии – приоритетная задача энергетической стратегии развития России // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 4(43). С. 40–52.
10. *Панков Б.В., Илюшин П.В., Куликов А.Л.* Надежность и эффективность современного электроснабжения: монография. Нижний Новгород: Научно-издательский центр “XXI век”, 2021. 160 с.
11. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.
12. *Илюшин П.В., Куликов А.Л.* Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. 364 с.
13. *Фальшина В.А., Куликов А.Л.* Алгоритмы упрощенной цифровой фильтрации электрических сигналов промышленной частоты // Промышленная энергетика. 2012. № 5. С. 39–46.
14. *Рибейро Пауло Ф., Дукс Карлос А., да Силвейра Пауло М., Серкейра Аугусто С.* Обработка сигналов в интеллектуальных сетях энергосистем. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. 480 с.
15. *Беляев Ю.К.* Вероятностные методы выборочного контроля. М.: Наука, 1975. 408 с.
16. *Коуден Д.* Статистические методы контроля качества. Пер. с англ. М.: Физматгиз, 1961. 623 с.
17. *Мхитарян В.С.* Статистические методы в управлении качеством продукции. М.: Финансы и статистика, 1982. 119 с.
18. ГОСТ Р 50779.76-2018 (ИСО 39511:2018) Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по количественному признаку. Планы последовательного контроля для процента несоответствующих единиц продукции (стандартное отклонение известно). М.: Стандартинформ, 2018. 28 с.
19. ГОСТ Р 50779.50-95. Статистические методы. Приемочный контроль качества по количественному признаку. Общие требования. М.: Госстандарт России, 1995. 19 с.
20. ГОСТ Р 50779.12-2021. Статистические методы. Статистический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции. М.: Стандартинформ, 2021. 14 с.
21. *Шор Я.Б.* Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.: “Советское радио”, 1962. 552с.

22. Статистические методы контроля качества продукции / Ноулер Л. и др. / Пер. с англ. – 2-е русс. Изд. М.: Издательство стандартов, 1989. 96 с.
23. Куликов А.Л., Илюшин П.В., Лоскутов А.А. Повышение быстродействия последовательного анализа в устройствах автоматики энергосистем энергорайонов с распределенной генерацией // Электротехника. 2021. № 2. С. 34–41.
24. Вальд А. Последовательный анализ. М.: Физматлит, 1960. 328 с.

Monitoring Selected Indicators for Electric Power Quality Testing in Modern Electricity Delivery Systems

A. L. Kulikov^a, A. A. Sevostyanov^a, and P. V. Ilyushin^{b, *}

^a*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

^b*Energy Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: ilyushin.pv@mail.ru*

This paper analyzes the specifics of today's electricity delivery systems and the ever more stringent requirements to electric power quality indicators (EPQI) as measured at the point of load connection to the operator's external grid. Significant deviations in EPQIs may cause substantial damage to customers, as their power system protections will disconnect the loads, causing overheating and faster wear and tear of some production line components; this necessitates adoption of continuous monitoring or reading selected EPQIs. The paper substantiates the expediency of transition from monitoring the entire set of individual of EPQIs to a generalized (complex) EPQI that incorporates and simultaneously reads multiple parameters. It further proves the effectiveness of combining simulation modeling and EPQI instrumentation readings to analyze the EPQIs in greater detail by applying selective monitoring. The paper presents the case of sequential decision-making that relies on the generalized EPQI and applies Wald's sequential analysis to adapt the EPQI monitoring procedure to the specific electricity delivery circuitry. It also showcases the flowchart of the author-developed device that implements selective monitoring of the generalized EPQI. To conclude, the paper describes an approach to finding the scope of selective monitoring data that would, on average, be required to make a decision on electric power quality as part of the sequential analysis procedure.

Keywords: electricity delivery system, selective monitoring, generalized electric power quality indicator, simulation modeling, Wald's sequential analysis