

Метод обнаружения систематических ошибок при измерениях в электроэнергетической системе¹

ГЛАЗУНОВА А.М.

Задача обнаружения ошибок в измерениях может быть решена только при наличии информационной избыточности. В условиях низкой информационной избыточности эффективность методов распознавания искажения измерений невысокая. Представлен метод, обладающий способностью обнаруживать систематические ошибки в измерениях при низкой избыточности. Разработанный метод представляет собой реализацию следующих шагов: вычисление статистического критерия с целью проверки нулевой гипотезы о равенстве средних значений измерений и их оценок; вычисление и анализ евклидова расстояния между вектором статистических критериев, полученным в режиме реального времени, и каждым эталонным вектором. Матрица эталонных векторов вычисляется заранее. Задача решается на базе псевбодинамического оценивания состояния.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, измерения, систематическая ошибка, информационная избыточность, оценивание состояния

Эффективность управления электроэнергетической системой (ЭЭС) определяется степенью достоверности и полноты информации о текущем состоянии ЭЭС. Эта информация собирается с помощью системы SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) и регистраторов комплексных электрических величин (PMU – Phasor Measurement Units). При управлении ЭЭС за достоверность и полноту информации отвечает задача оценивания состояния (ОС) [1, 2], которая вычисляет параметры установившегося режима по срезу измерений (измерения, полученные в один и тот же момент времени). Высокое качество оценок обеспечивается при заблаговременном выявлении и подавлении грубых ошибок в измерениях. Задача обнаружения ошибок в измерениях решается при условии информационной избыточности. Под информационной избыточностью понимается наличие в измерительной информации дополнительных, не требующихся для обеспечения наблюдаемости ЭЭС измерений, благодаря которым можно обнаружить и устранить искажения в информации, допущенные при её передаче, обработке или вследствие других причин. В условиях низкой информационной избыточности при обработке одного среза измерений распознавание искажения измерений (внесение грубой ошибки в измерение) не представляется возможным. Это означает, что задача достоверизации измерений не решается, измерения остаются непроверенными и, как следствие, достоверность информации не обеспечивается. Если грубая ошибка в измерении присутствует продолжительное время, то такая ошибка называется сис-

тематической. Знание того, что ошибка является систематической, дает возможность устранить причины ее возникновения. Например, появляется обоснование для исследования всего метрологического тракта, по которому данное измерение поступает в диспетчерский пункт с целью поиска и замены неисправного элемента.

Систематическая ошибка в измерении обнаруживается в результате анализа некоторого параметра, выбранного в качестве контролируемого. В зависимости от этого параметра существующие методы достоверизации измерений могут быть разделены на четыре группы.

К первой группе методов относятся методы, в которых анализируется выполнение балансовых соотношений. В [3] представлен алгоритм обнаружения систематических ошибок в измерениях, входящих в контрольные уравнения. В качестве анализируемого параметра используется невязка контрольного уравнения. Большое значение невязки свидетельствует о наличии систематической ошибки в одном из измерений. В условиях низкой информационной избыточности часть измерений не входит в контрольные уравнения, а следовательно, они остаются непроверенными.

Вторая группа методов основана на расчете и проверке инноваций – разности между значением измерения и прогнозом [4–6]. Недостатком данного метода является неправильная идентификация ошибочных измерений в случае некорректного прогноза, что недопустимо в условиях низкой избыточности измерений.

В третьей группе методов ошибки в измерениях определяются по остаткам оценивания – разности между измерениями и оценками. В [7] пока-

¹ Работа выполнена по гранту Президента РФ о поддержке ведущей научной школы (НШ- 4711.2014.8).

зано, что значение наибольшего остатка, превышающего порог, говорит об ошибке в данном измерении. Но обратное неверно – отсутствие остатков оценивания, превышающих порог, не говорит о достоверности всех измерений. В [7] для обнаружения наличия грубой ошибки в измерениях введен специальный индекс. Анализ этого индекса показывает степень обнаруживаемости ошибки в измерении. Например, для критического измерения индекс равен бесконечности, что говорит о невозможности выявить в нем ошибку. В [8] выявляются систематические ошибки в измерениях энергии по относительному значению расчетной погрешности (по остаткам оценивания). Данные величины вычисляются на множестве интервалов с целью определения математических ожиданий, которые дают оценку систематической ошибки каждого измерения. Недостатком метода является неправильная идентификация ошибочного измерения в случае возникновения ситуации, в которой нарушается правило о соответствии наибольшего остатка оценивания ошибочному измерению.

К четвертой группе методов можно отнести методы, предназначенные для выявления систематических ошибок при испытании РМУ. В [9] рассматривается метод идентификации систематических ошибок, причиной появления которых является некорректная работа алгоритма дискретного преобразования Фурье в динамических условиях. Метод основывается на факте, что чем меньше систематические ошибки, тем ближе кривая распределения ошибок расположена к кривой нормального распределения. Для определения степени схожести распределений используется специальный индекс. При отсутствии систематических ошибок данный индекс равен нулю. В режиме реального времени использование данного алгоритма невозможно из-за отсутствия истинного значения измерения.

Недостатки перечисленных методов – неспособность обнаружения ошибок в измерениях из-за отсутствия возможности составления балансовых соотношений (методы первой группы); неправильная идентификация ошибочных измерений в случае некорректного прогноза (методы второй группы); неправильная идентификация ошибочного измерения при возникновении ситуации, в которой имеет место несоответствие наибольшего остатка оценивания ошибочному измерению (методы третьей группы) – особенно значимо проявляются в условиях низкой информационной избыточности.

Целью данной статьи является разработка метода обнаружения систематических ошибок в измерениях при низкой информационной избыточности

для обеспечения достоверности и полноты информации о состоянии ЭЭС. Разработанный метод можно отнести к усовершенствованному методу третьей группы. В соответствии с предложенным методом анализируется не каждое измерение отдельно, а сложившаяся ситуация в целом, что уменьшает вероятность получения некорректного решения задачи достоверизации измерений.

Задача решается на базе псевдодинамического ОС, под которым понимается статическое ОС, работающее в цикле управления ЭЭС, где для неизмеренных компонент вектора состояния используются их значения, вычисленные в предшествующий момент времени (на предыдущем цикле).

Исходная информация для оценивания состояния. Оперативная информация, которая обрабатывается методами оценивания состояния, представляется в виде вектора измерений:

$$\bar{y} = (U_i, P_i, Q_i, P_{ij}, Q_{ij}, d_i), \quad (1)$$

где U_i – модули узловых напряжений; P_i, Q_i – инъекции активных и реактивных мощностей в узлах; P_{ij}, Q_{ij} – перетоки мощностей в трансформаторах и линиях; d_i – фазы напряжений от РМУ.

Модель измерения выглядит следующим образом:

$$\bar{y}_i = y_{\text{ист}(i)} + x_{y(i)}; x_{y(i)} \hat{=} N(0, s_{y(i)}^2), \quad (2)$$

где $y_{\text{ист}(i)}$ – истинная величина; $x_{y(i)}$ – нормально распределенная помеха (случайная ошибка); $s_{y(i)}^2$ – дисперсия ошибки измерения, которая определяется исходя из характеристики метрологического тракта.

Модель измерения с грубой или систематической ошибкой имеет вид

$$\bar{y}_{\text{гр}(i)} = y_{\text{ист}(i)} + x_{\text{гр}(i)}; x_{\text{гр}(i)} \hat{=} N(m, s_{y(i)}^2), \quad (3)$$

где m – математическое ожидание ошибки.

Метод идентификации систематических ошибок. Метод идентификации систематической ошибки в измерении основан на утверждении, что при отсутствии ошибки в измерении значения математических ожиданий измерения $M(\bar{y})$ и оценки $M(\hat{y})$ равны друг другу. Обе выборки имеют нормальное распределение, длина выборки не меньше 30. Для проверки, значимо ли отличаются друг от друга средние значения двух выборок, используется критерий Стьюдента [10]. Уровень значимости t -критерия равен вероятности ошибочно отвергнуть гипотезу о равенстве выборочных средних двух выборок, когда в действительности эта гипотеза имеет место. Формируется нулевая гипотеза о равенстве математических ожиданий двух статистик:

$$H_0: M(\bar{y}_j) = M(y_j) \tag{4}$$

В качестве статистического критерия выбирается величина [11]:

$$Z_y = \frac{\bar{y}_{cp} - y_{cp}}{\sqrt{s_y^2 / (k2 - 1) + s_s^2 / (k2 - 1)}} \tag{5}$$

где \bar{y}_{cp} , y_{cp} – средние значения измерений и оценок за $k2$ срезов; s_y^2 , s_s^2 – дисперсии измерений и оценок.

Для проверки гипотезы определяется правая граница двусторонней критической области по таблице из условия $F(z_{кр}) = (1 - \alpha) / 2$, где α – уровень значимости гипотезы [11].

При $Z_y < z_{кр}$ гипотеза не отклоняется и измерение \bar{y}_j рассматривается достоверным. В действительности часто встречается ситуация, когда из-за наличия ошибки в одном измерении отклоняются гипотезы для нескольких достоверных измерений или, наоборот, нулевая гипотеза с заданным уровнем значимости не отклоняется для ошибочного измерения. В сложившейся ситуации для идентификации ошибочного измерения предлагается вычислять критерии для всех исследуемых измерений и анализировать вектор критериев, а не каждый критерий отдельно. Под анализом вектора критериев понимается сравнение полученного вектора с эталонным вектором.

Сходство или различие между векторами устанавливается в зависимости от выбранного метрического расстояния между ними. Каждый вектор описывается признаками (значениями критериев) и может быть представлен точкой в n -мерном пространстве. Сходство с другими векторами определяется по правилу: чем меньше расстояние, тем больше сходство. В статье в качестве меры расстояния используется евклидово расстояние – ошибочное измерение идентифицируется в результате вычисления и анализа евклидова расстояния между векторами критериев. Этот подход требует предварительного формирования срезов с ошибочными и достоверными измерениями. На рис. 1 показан алгоритм формирования эталонной матрицы критериев для разных срезов в режиме *off-line*.

Сначала вычисляется вектор критериев для среза, состоящего из n достоверных измерений $m = 0$. В каждом следующем срезе моделируется грубая ошибка в одном из измерений $m_j \neq 0$ и снова вычисляется вектор критериев. Для учета разнообразных режимов и ошибок в измерениях рассматривается K режимов, где $K = (n + 1)m$. Таким образом, создается матрица критериев M_KRIT размерно-

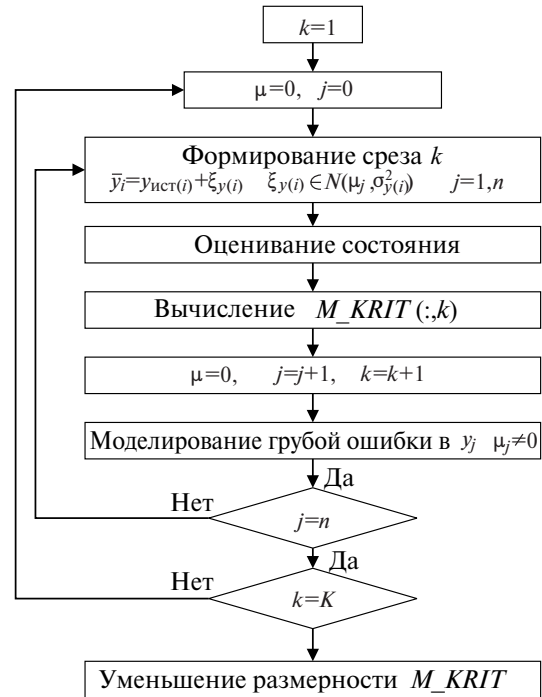


Рис. 1. Алгоритм формирования эталонной матрицы

стью $(n \times K)$, где n – число исследуемых измерений, +1 означает увеличение числа столбцов за счет вектора критериев среза без ошибочных измерений, $m > 1$. Для уменьшения размерности матрицы M_KRIT до $(n \times r)$ выполняется классификация векторов на r классов и вычисляются координаты каждого класса. В режиме *on-line* (рис. 2) вычисляется вектор критериев реального среза V_KRIT размерностью $(1 \times n)$ и определяется евклидово расстояние между вектором V_KRIT и векторами подготовленной заранее матрицы M_KRIT . Наименьшее расстояние означает совпадение векторов. Номер столбца в матрице означает номер ошибочного измерения.

Повышение качества результатов оценивания состояния. Из-за наличия ошибки в измерении качество результатов оценивания состояния ухудшается. Для поддержания качества необходимо уменьшить влияние ошибочного измерения на результат



Рис. 2. Алгоритм определения ошибочного измерения

оценивания состояния. Одним из способов подавления влияния систематической ошибки измерения на результат оценивания состояния является корректировка измерения путем вычитания значения ошибки из значения измерения:

$$\bar{y}_i = y_{ист(i)} \pm 3s_{y(i)} + b_j - m_j, \quad (6)$$

где b_j – систематическая ошибка;

$$m_j = M(\bar{y}_j) - M(y_j). \quad (7)$$

При решении данной задачи главная проблема заключается в определении значения m_j . При низкой избыточности измерений эта задача не является тривиальной. Существуют ошибочные измерения, для которых $m_j = 0$, и, наоборот, существуют достоверные измерения, для которых $m_j \neq 0$. В статье проблема определения m_j решается так же, как проблема определения ошибочного измерения – по номеру столбца в эталонной матрице M_KRIT . Чем больше число режимов K , тем точнее определяется m_j ($m_j \approx b_j$).

Тестовый пример. Работоспособность предложенного метода иллюстрируется в имитационном эксперименте. Задача обнаружения систематических ошибок в измерениях с низкой избыточностью решается на 13-узловой схеме (рис. 3) для реактивной модели. В данной схеме измеряются 15

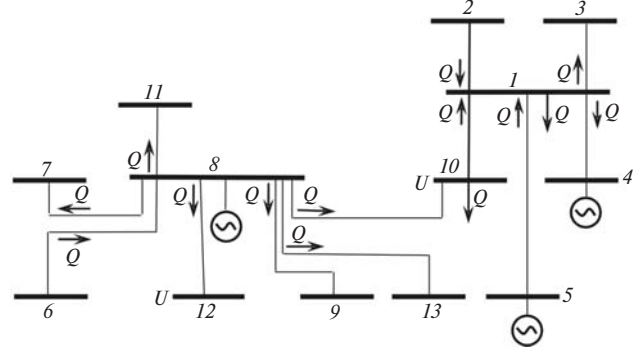


Рис. 3. Тестовая схема: U – измерение напряжения; Q – измерения перетока или инъекции реактивной мощности

параметров режима, три параметра режима являются избыточными.

В режиме *off-line* создается массив эталонов M_KRIT в соответствии с алгоритмом рис. 1. Ошибка в значении измерения моделируется по формуле

$$\bar{y} = y_{ист} + x_{сл} s_y + b, \quad (8)$$

где $x_{сл}$ – величина, сгенерированная датчиком случайных чисел; b – систематическая ошибка.

При создании M_KRIT рассматривается несколько значений b для каждого измерения. Например, при моделировании ошибки в измерении Q_{8-12} $b = 18, 60$. В табл. 1 показаны значения статистического критерия (5) для четырнадцати измере-

Таблица 1

| Номер п/п | Измерение | Ошибочное измерение | | | | |
|-----------|------------|---------------------|----------|------------|------------|------------|
| | | U_{12} | U_{10} | Q_{8-12} | Q_{8-10} | Q_{1-10} |
| 1 | U_{12} | 4,5691 | -2,8642 | 1,1345 | -6,5642 | 0,6637 |
| 2 | U_{10} | -3,7091 | 6,0776 | -1,3405 | 5,6433 | 3,2648 |
| 3 | Q_1 | 0,0641 | 0,1930 | 0,1523 | 0,0243 | -2,7974 |
| 4 | Q_{1-2} | -0,0558 | -0,1826 | -0,1628 | -0,0260 | 2,8420 |
| 5 | Q_{1-3} | -0,0664 | -0,1970 | -0,1534 | -0,0129 | 2,8197 |
| 6 | Q_{1-4} | -0,0581 | -0,2180 | -0,1647 | -0,0424 | 2,8453 |
| 7 | Q_{1-5} | -1,5439 | -5,8780 | 0,0143 | 2,0098 | -4,5519 |
| 8 | Q_{1-10} | 1,2621 | 4,8260 | -0,3547 | -1,9381 | 9,8612 |
| 9 | Q_{6-8} | 0,0000 | -0,0000 | 0,0000 | -0,0000 | -0,0000 |
| 10 | Q_{7-8} | 0,0004 | -0,0006 | 0,0001 | 0,0001 | -0,0002 |
| 11 | Q_{8-9} | -0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12 | Q_{8-10} | -7,8346 | 5,7598 | -2,2465 | 13,2689 | -1,1829 |
| 13 | Q_{8-11} | -0,0000 | -0,0000 | -0,0000 | -0,0000 | -0,0000 |
| 14 | Q_{8-12} | 2,8106 | -2,0399 | 0,8339 | -4,6038 | 0,4209 |
| 15 | Q_{8-13} | -0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

ний в условиях наличия ошибки в одном из пяти измерений.

В режиме *on-line* вычисляется вектор критериев значимости V_KRIT и определяется минимальное евклидово расстояние.

Решение задачи достоверизации подробно рассматривается на примере измерения перетока реактивной мощности Q_{8-12} . Ошибка Q_{8-12} в измерении моделируется по формуле $\bar{Q} = Q_{ист} + x_{сл} 6 + 20$ Мвар.

Систематическая ошибка $b = 20$ Мвар, $s = 6$ Мвар (рис. 4,а). В табл. 2 приведены ненулевые значения критерия (5) для каждого измерения.

Таблица 2

| Номер | Измерение | Ненулевые значения критерия (5) |
|-------|------------|---------------------------------|
| 1 | U_{12} | 1,9 |
| 2 | U_{10} | -1,6 |
| 3 | Q_1 | -0,3 |
| 4 | Q_{1-2} | 0,2 |
| 5 | Q_{1-3} | 0,3 |
| 6 | Q_{1-4} | 0,3 |
| 7 | Q_{1-5} | -0,3 |
| 8 | Q_{1-10} | 1,0 |

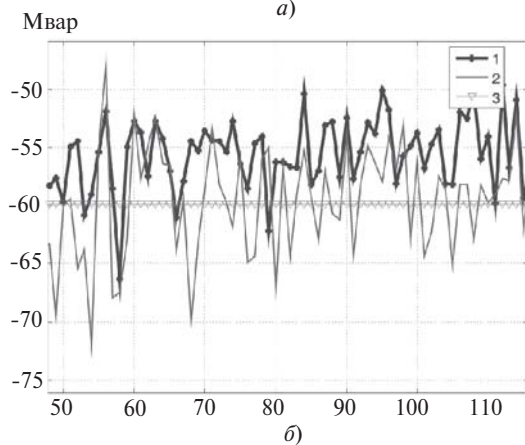
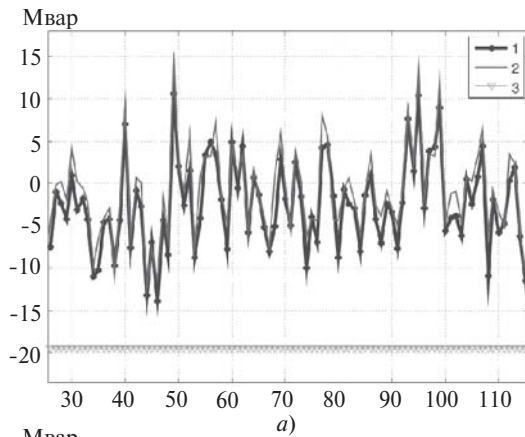


Рис. 4. Графики оценок, измерений и эталона: а — Q_{8-12} — ошибочное; б — Q_{8-10} — достоверное; 1 — оценки; 2 — измерения; 3 — эталон

| | | |
|----|------------|------|
| 12 | Q_{8-10} | -3,9 |
| 14 | Q_{8-12} | 1,4 |

Анализ вектора критериев, выполненный из условия, что уровень значимости нулевой гипотезы $\alpha = 0,05$, $k_2 = 30$, $z_{кр} = 2,04$, показывает:

нулевая гипотеза не отклоняется для Q_{8-12} (№ 14 в табл. 2), так как условие $Z_y < z_{кр}$ выполняется: $1,4 < 2,04$;

нулевая гипотеза отклоняется для Q_{8-10} (№ 12 в табл. 2), так как условие $Z_y < z_{кр}$ нарушено: $3,9 < 2,04$.

Графики оценок, измерений и эталона для Q_{8-12} и Q_{8-10} показаны на рис. 4 (по горизонтали представлены номера срезов).

Из рис. 4,а видно:

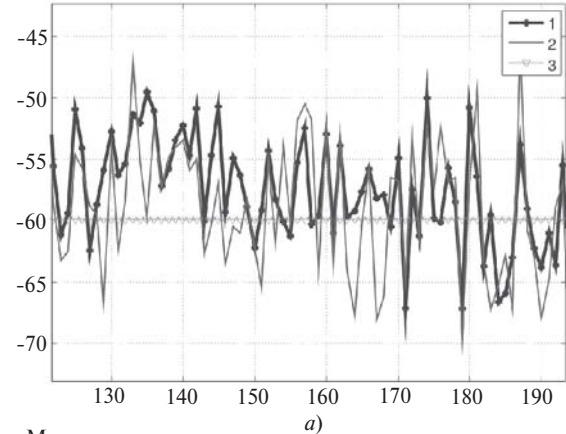
ошибка в измерении присутствует, так как измерение 2 расположено выше эталона 3;

матожидания оценки 1 и измерения 2 равны между собой, что не позволяет выявить ошибку.

Анализ значения критерия для Q_{8-12} ($1,4 < 2,04$) и рис. 4,а свидетельствуют о достоверности измерения. Данный вывод является ошибочным.

Из рис. 4,б видно:

Мвар



Мвар

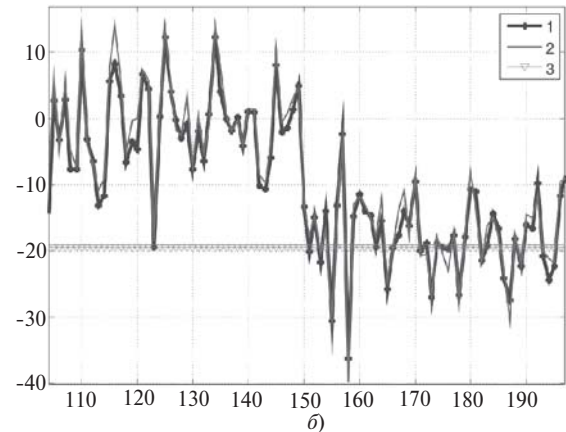


Рис. 5. Графики измерения и оценки до и после корректировки: а — Q_{8-10} (корректировка Q_{8-12} после 150 среза); б — Q_{8-12} до и после корректировки; 1 — оценки; 2 — измерения; 3 — эталон

ошибка в измерении Q_{8-10} отсутствует, так как измерение 2 расположено вдоль графика эталона 3; матожидания оценки 1 и измерения 2 не равны между собой, $m \neq 0$, что указывает на присутствие ошибки в измерении.

Анализ значения критерия для Q_{8-10} ($|-3,9| < 2,04$) и рис. 4,б свидетельствуют о наличии ошибки в измерении. Данный вывод является ошибочным.

Согласно предложенному методу ошибочное измерение идентифицируется в результате анализа вектора критериев, который показал, что полученный вектор критериев V_KRT имеет наименьшее евклидово расстояние с номером 5, табл. 1. Это означает, что ошибочным измерением является Q_{8-12} и $b = m = 18$. После обнаружения ошибки (для наглядности это будет срез 150) пересчитывается значение измерения Q_{8-12} по формуле (6). На рис. 5 показаны результаты оценивания состояния после исключения систематической ошибки.

Из рис. 5 видно, что графики измерения и оценки после среза 150 приближаются к эталону. Это означает, что ошибочное измерение идентифицировано верно и процесс подавления ошибки выполнен корректно.

Результаты работы метода обнаружения систематических ошибок в семи измерениях сведены в табл.

3. Выражение $b = m$ означает: в режиме *off-line* измерение моделируется с грубой ошибкой b , а в режиме *on-line* – это матожидание ошибки. Из табл. 3 видно, что при данном эталонном массиве M_KRIT уверенность в наличии систематической ошибки в некоторых измерениях меньше 100%, но больше 51%, что позволяет правильно интерпретировать ответ.

Анализ данных, выделенных курсивом, показывает, что ошибочное измерение распознано как ошибочное, хотя оно не является даже подозрительным. Из табл. 3 также следует, что значение матожидания ошибки по (7) меньше соответствует значению грубой ошибки, чем матожидание, полученное с помощью предложенного метода (столбец 3). Для корректировки измерения по (6) используется значение m приведенное в третьем столбце.

Закключение. Работоспособность представленного метода обнаружения систематических ошибок в измерениях проверена в имитационном эксперименте. Разработанный метод распознает даже такое ошибочное измерение, для которого нулевая гипотеза не отклонена с заданным уровнем значимости и не объявляет ошибочным достоверное измерение, для которого отклонена нулевая гипотеза.

Разработанный метод позволяет улучшить качество получаемых оценок за счет корректировки ошибочных измерений. Процесс корректировки заключается в исключении математического ожида-

Таблица 3

| Ошибочное измерение | Значение ошибки | | Подозрительные измерения | Вероятность того, что данное измерение ошибочное, % | Результат обнаружения ошибки | Значение | |
|---------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|---|------------------------------|------------|-------------------|
| | случайной $\pm 3s$ | систематической $b = m$ | | | | m по (7) | b (факт) по (8) |
| U_{12} | $\pm 1,5$ | 1,9 | 1,2,12,14 | 99 | U_{12} | 0,3 | 2 |
| | | 2,9 | 1,2,12,14 | 70 | | 0,5 | 3 |
| U_{10} | $\pm 1,5$ | 1,9 | 1,2,7,8,12 | 100 | U_{10} | 1,2 | 3,9 |
| | | 2,9 | 1,2,7,8,12,14 | 100 | | 1 | 3 |
| Q_{8-12} | ± 18 | 18 | <i>12</i> | <i>100</i> | Q_{8-12} | 2 | 20 |
| | | 60 | 1,2,8,12,14 | 70 | | 6 | 70 |
| Q_{8-10} | ± 18 | 24 | 1,2,12,14 | 100 | Q_{8-10} | 18 | 30 |
| | | 44 | 1,2,7,8,12,14 | 100 | | 29 | 54 |
| Q_{1-10} | ± 18 | 24 | 2,3,4,5,6,7,8 | 98 | Q_{1-10} | 17 | 30 |
| | | 44 | 2,3,4,5,6,7,8,12 | 100 | | 26 | 50 |
| Q_{1-5} | ± 18 | 24 | 2,3,4,5,6,7,8,12 | 100 | Q_{1-5} | 19 | 30 |
| | | 44 | 1,2,3,4,5,6,7,8,12 | 100 | | 30 | 50 |
| Q_1 | ± 18 | 24 | 3,4,5,6,7,8 | 100 | Q_1 | 5 | 30 |
| | | 44 | 3,4,5,6,7,8 | 100 | | 10 | 50 |

ния систематической ошибки из значения измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамм А.З., Глазунова А.М., Гришин Ю.А., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы. — *Электричество*, 2009, № 6, с. 2—10.
2. Glazunova A.M., Kolosok I.N., Korkina E.S. Monitoring of EPS operation by the state estimation methods. — Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe-2011). Great Britain, Manchester, 5—7 December, 2011.
3. Колосок И.Н., Коркина Е.С. Обнаружение систематической ошибки в измерительных трансформаторах методами оценивания состояния по данным РМУ. — Сб. материалов Выставки-конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем». Москва, 27—29 мая 2014, с. 526—530.
4. Глазунова А.М., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Повышение достоверности измерений от РМУ для расчета и анализа текущего режима ЭЭС. — Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 61. Проблемы исследования и обеспечения надежности либерализованных систем энергетики. Иркутск, 2011, с. 149—156.
5. Do Coutto Filho M.B., Stacchini de Souza J.C., Freund R.S. Forecasting-aided state estimation — Part 2: Implementation. — *IEEE Trans. Power Syst.*, 2009, vol. 24, No. 4, 1667—1677.
6. Yun Yang, Wei Hu, Yong Min. Projected unscented Kalman filter for dynamic state estimation and bad data detection in power

system. — 12th IET International Conference on «Developments in Power System Protection» (DPSP 2014).

7. Bretas N.G., London Jr J.B.A., Alberto L.F.C., Benedito R.A.S. Geometrical approaches for gross errors analysis in power systems state estimation. — Bucharest. Power Tech Conference, 2009.

8. Копсяев А.П., Машалов Е.В., Паздерин А.В., Травкин А.А. Выявление систематических погрешностей измерительных комплексов учета электроэнергии на основе математической обработки результатов измерений. — Сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции «Энергосистема: управление, качество, безопасность». Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2001, с. 457—460.

9. Yula Hu, Yi Wang, Ranran An, Tianshu Bi, Qian Feng, Fan Wang. Systematic error identification and analysis for PMU dynamic performances. — Proc. of the International Conference «PowerTech'2013». Grenoble (France), 16—20 June, 2013.

10. Крамер Г. Математические методы статистики. — М.: Изд-во МИР, 1975, 648 с.

11. Гефан Г.Д. Статистический метод и основы его применения: Учебное пособие по математике, статистике и эконометрике. — Иркутск 2003, 307 с.

Автор: Глазунова Анна Михайловна окончила энергетический факультет Иркутского политехнического института в 1982 г. В 2002 г. защитила кандидатскую диссертацию «Применение методов искусственного интеллекта для решения задач обработки измерительной информации в ЭЭС» в Инсти-

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 5, pp. 15—22.

Method for Detecting Systematic Errors in the Measurements of Electric Power System Parameters

A.M. GLAZUNOVA

The problem of detecting errors in measurements can be solved only if there is information redundancy. The measurements distortion recognition methods show poor efficiency under the conditions of low information redundancy. A method able to detect systematic errors in measurements under the conditions of low information redundancy is presented. The developed method involves the following steps: calculating a statistical criterion for checking the null hypothesis about the equality of mean values of measurements and their estimates, calculating and analyzing the Euclidean distance between the vector of statistical criteria obtained in the online mode and each reference vector. The matrix of reference vectors is calculated in advance. The problem is solved on the basis of pseudo dynamic state estimation.

Key words: *electric power system, measurements, systematic error, information redundancy, state estimation*

REFERENCES

1. Camm A.Z., Glazunova A.M., Griahin Yu.A., Kolosok I.I., Korkina Ye.S. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 6, pp. 6—10.
2. Glazunova A.M., Kolosok I.N., Korkina E.S. Monitoring of EPS operation by the state estimation methods. — Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe-2011). Great Britain, Manchester, 5—7 December, 2011.
3. Kolosok I.N., Korkina Ye.S. *Sbornik materialov Vystavki-konferentsii «Releynaya zashchita i avtomatika energosistem* (The collection of materials of the exhibition-conference «Relay

protection and automation of power systems»). Moscow, 27—29, May, 2014, pp. 526—530.

4. Glazunova A.M., Kolosok I.N., Korkina Ye.S. *Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki. Vyp. 61. Problemy issledovaniya i obespecheniya nadezhnosti liberalizovannykh sistem energetiki* (Methodical research questions the reliability of large-scale power systems. Iss. 61. Problems of research and ensure the reliability of the liberalized energy systems). Irkutsk, 2011, pp. 149—156.

5. Do Coutto Filho M.B., Stacchini de Souza J.C., Freund R.S. Forecasting-aided state estimation — Part 2: Implementation. — *IEEE Trans. Power Syst.*, 2009, vol. 24, No. 4, 1667—1677.

6. **Yun Yang, Wei Hu, Yong Min.** Projected unscented Kalman filter for dynamic state estimation and bad data detection in power system. — 12th IET International Conference on «Developments in Power System Protection» (DPSP 2014).

7. **Bretas N.G., London Jr J.B.A., Alberto L.F.C., Benedito R.A.S.** Geometrical approaches for gross errors analysis in power systems state estimation — Bucharest. Power Tech Conference, 2009.

8. **Копсыяев А.П., Mashalov Ye.V., Pazderin A.V., Travkin A.A.** *Sbornik dokladov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energosistema: upravleniya, kachestvo, bezopasnost'»* (Collection of reports of the All-Russian scientific and technical conference «Power

system: management, quality, safety»). Ekaterinburg, Ural State Technical University, 2001, pp. 457–460.

9. **Yula Hu, Yi Wang, Ranran An, Tianshu Bi, Qian Feng, Fan Wang.** Systematic error identification and analysis for PMU dynamic performances. — Proc. of the International Conference «PowerTech'2013». Grenoble (France) 16–20 June, 2013.

10. **Kramer G.** *Matematicheskiye metody statistiki* (Methodical methods of statistics). Moscow, Publ. MIR, 1975, 648 p.

11. **Gefan G.D.** *Staticheskii metod i osnovy ego primeneniya. Uchebnoye posobiye po matematike, statistike i ekonometrike* (Statistical method and the basis of its application. Handbook on mathematics, statistics and econometrics). Irkutsk, 2003, 207 p.

Author: Glazunova Anna Mikhailovna (Irkutsk, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Senior scientific researcher at the L.A. Melent'ev Institute of Power Systems, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

туте систем энергетике им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН). Старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.