

# МЕТОДИКА ДОСТОВЕРИЗАЦИИ ТИ В ПВК «ОЦЕНКА»

И.Н. Колосок

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

## 1. Задача достоверизации ТИ и выбор метода ее решения

В телеизмерениях (ТИ) параметров режима ЭЭС и телесигналах (ТС) о состоянии коммутационного оборудования, поступающих в диспетчерские пункты управления энергосистемой, наряду со случайными погрешностями достаточно часто встречаются грубые ошибки. Методы оценивания состояния (ОС), используемые для расчета текущего режима ЭЭС по полученным значениям ТИ и ТС, дают, как правило, надежное решение только при отсутствии грубых ошибок в ТИ и задании топологии схемы.

Причины появления грубых ошибок очень разнообразны, чаще всего это технические причины, связанные с использованием устаревшего измерительного оборудования, чувствительного к помехам и температуре окружающего воздуха, внезапно возникающие неисправности в системе сбора и передачи данных, неодновременность снятия показаний, ошибки персонала и т.д.

Появление таких ошибок вызывает искажение полученного при ОС режима и может привести к неверным результатам при решении задач, работающих на базе полученного режима, что в свою очередь может вызвать неправильные решения при управлении ЭЭС. Поэтому обнаружение ошибочных ТИ или, как их часто называют, плохих данных, и подавление их влияния на результаты ОС является одной из наиболее важных задач, входящих в комплекс ОС в реальном времени.

Обнаружение “плохих данных” связано с тем или иным способом использования избыточности измерений, обеспечивающих получение информации о текущем состоянии ЭЭС, и, как правило, со статистическими методами обработки этой измерительной информации.

Разработанные в настоящее время методы обнаружения и подавления плохих данных можно разделить на три группы. В основу такой классификации положено место алгоритмов обнаружения плохих данных относительно задачи оценивания состояния.

К первой группе относятся методы априорного анализа качества измерений, использующие топологические свойства уравнений установившегося режима ЭЭС и априорные сведения о распределении ошибок измерений, и выявляющие грубые ошибки до решения задачи ОС. Вторую группу образуют методы, позволяющие в процессе решения задачи ОС одновременно с получением оценок выявить плохие данные и подавить их влияние на результаты. К третьей группе относятся методы апостериорного анализа, выявляющие плохие данные по результатам оценивания.

*При обработке ТИ в реальном времени предпочтение отдается методам первой группы, поскольку они, как правило, позволяют выявить все ошибочные ТИ до решения задачи ОС не зависимо от используемого алгоритма получения оценок и не требуют повторных расчетов, что имеет место при использовании методов второй и третьей группы.*

К методам априорного анализа относится метод контрольных уравнений, который был выбран в качестве основного для реализации в блоке достоверизации ТИ ПВК «Оценка»[1].

Априорная достоверизация ТИ выполняется в три этапа:

На первом этапе выполняется обработка обобщенных признаков достоверности ТИ, получаемых из ОИКа. Массив признаков достоверности считывается в программу ОС синхронно с массивом значений ТИ либо из подкаталога с текущей телеметрируемой информацией, либо из архива. Предусмотрены два режима обработки этих признаков в программе. В первом режиме ТИ, имеющие признаки недостоверности от ТМ, исключаются из оценивания, но это приводит к снижению избыточности измерений и иногда к потере наблюдаемости отдельных фрагментов схемы. Во втором режиме эти ТИ остаются в алгоритме оценивания, они участвуют в формировании контрольных уравнений (К.У.) и затем проводится их достоверизация по К.У.. При этом из алгоритма ОС исключаются только ТИ, не вошедшие в К.У., поэтому с точки зрения сохранения наблюдаемости схемы этот режим лучше.

Количество ТИ, поступивших с признаками недостоверности от ТМ, контролируется в программе. Если оно превышает некоторое максимально допустимое значение, задаваемое пользователем в виде процента от общего числа поступивших ТИ, то об этом выдается сообщение на экран монитора, и расчет прекращается.

На втором этапе после ввода значений ТИ и формирования ПИ выполняется априорная проверка их значений, при этом контролируются:

- знаки ТИ мощностей активной и реактивной генерации;
- знаки ПИ мощностей нагрузок в нагрузочных узлах;
- если заданы пределы изменения напряжений в узлах, то ТИ напряжений проверяются на пределы, при нарушении пределов значение ТИ заменяется на предел;
- аналогичная проверка выполняется для ТИ генераций реактивной мощности.
- Кроме этого:
- проверяется соответствие направлений перетоков активной мощности по концам линий;
- значения ТИ перетоков активной и реактивной мощности сравниваются с максимально допустимой величиной;
- рассогласование величин перетоков активной мощности сравнивается с максимально допустимым;
- подсчитываются узловые балансы ТИ активной и реактивной мощности и сравниваются с максимально допустимым небалансом.

Если число ошибок, выявленное на втором этапе анализа ТИ, превышает максимально допустимое, определяемое пользователем программы, то об этом выдается сообщение на экран монитора, и расчет прекращается.

На третьем этапе выполняется достоверизация ТИ с помощью контрольных уравнений [2]. Ниже дается математическая формулировка задачи достоверизации ТИ по КУ и алгоритм ее решения, реализованный в программе.

## *2. Достоверизация ТИ с использованием КУ.*

В качестве критерия для поиска ошибочных ТИ используются модули невязок контрольных уравнений, которые могут быть получены из системы уравнений установившегося режима (УУР) ЭЭС

$$w(y, z) = 0, \quad (1)$$

в которые могут входить как измеренные  $y$ , так и неизмеренные  $z$  параметры режима.

Для получения контрольных уравнений из системы уравнений (1) необходимо исключить неизмеренные параметры  $z$ . Для этого разделим ее на две подсистемы

$$w_1(y, z) = 0, \quad (2)$$

$$w_2(y, z) = 0 \quad (3)$$

таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\text{rank}\left(\frac{\partial w_2}{\partial z}\right) \neq 0. \quad (4)$$

Тогда из подсистемы (3) можно определить неизмеренные параметры  $z$ , т.е. найти зависимости  $z(y)$ . Подставив их в подсистему (2), мы получим уравнения, в которые входят только измеренные параметры  $y$ :

$$w_1(y, z(y)) = w_k(y) = 0. \quad (5)$$

Это и есть система *контрольных уравнений*.

*Основная идея априорного обнаружения грубых ошибок с использованием КУ базируется на следующих логических правилах:*

1) При отсутствии ошибок в измерениях небалансы (невязки) КУ равны нулю. Подстановка значений измерений  $\bar{y}$  в КУ приводит к появлению небалансов КУ из-за наличия ошибок измерений.

2) Пренебрегая относительно малой вероятностью взаимной компенсации грубых ошибок измерений, входящих в  $k$ -е КУ, можно считать входящие в данное КУ измерения достоверными, если его невязка  $w_k$  не превышает некоторой пороговой величины  $d_k$ , определяемой, в основном, дисперсиями входящих в него ТИ.

3) Если невязка контрольного уравнения велика, т.е. не выполняется условие

$$|w_k| \leq d_k, \quad (6)$$

то хотя бы одно из входящих в данное КУ измерений содержит грубую ошибку.

4) Если выделена группа  $w_k^{(m)}$  из  $m$  КУ с большими невязками, в которые входят только  $m$  непроверенных еще измерений  $y_k$ , таких, что

$$\left| \frac{\partial w_k^{(m)}}{\partial y_k} \right| \neq 0, \quad (7)$$

а остальные входящие в  $w_k$  измерения уже объявлены ранее достоверными, то измеренные значения  $\bar{y}_k$  заменяются на вычисленные из уравнений

$$w_k^{(m)}(\hat{y}_k) = \bar{w}_k^{(m)};$$

значения измерения  $\hat{y}_k$  объявляются после этого достоверными и используются для проверки еще непроверенных измерений и для оценивания состояния, а значения  $\bar{y}_k$  объявляются плохими и не используются в дальнейшем.

Частным случаем, наиболее удобным для анализа, является выделение подсистем  $w_k$  первого порядка, т.е. таких отдельных уравнений с большими невязками, в которые входят измерения, уже объявленные достоверными, кроме одного, которое немедленно объявляется плохим и его измеренное значение заменяется на значение, вычисленное из условия равенства нулю невязки данного КУ;

5) Если существует линейная комбинация КУ с большими невязками такая, что после исключения из нее некоторых непроверенных переменных полученные новые КУ имеют малые невязки, то все входящие в новые КУ измерения объявляются достоверными, а исключаемые переменные - ошибочными.

Например, есть две подсистемы КУ:

$$w_k^{(1)}(\bar{y}_1, \bar{y}_2) = \bar{w}_{k1} > d_{k1}, \quad (8)$$

$$w_k^{(2)}(\bar{y}_1, \bar{y}_2) = \bar{w}_{k2} > d_{k2}, \quad (9)$$

где  $d$  - порог, превышение которого говорит о наличии в  $w_k$  плохих данных. Если из (8) можно исключить  $y_1$  (т.е.  $\left| \frac{\partial w_k^{(1)}}{\partial y_1} \right| \neq 0$ ) и подставить  $y_1(y_2)$  в (9), после чего

оказывается, что

$$w_k^{(2)}(y_1(y_2), \bar{y}_2) < d, \quad (10)$$

то  $\bar{y}_2$  объявляются достоверными,  $\bar{y}_1$  заменяются на оценки  $\hat{y}_1$ , вычисляемые из (9).

При работе алгоритмов оценивания состояния в реальном времени для достоверизации ТИ в момент времени  $t$  можно использовать их значения из предшествующего момента  $\bar{y}(t-1)$  или полученные ранее оценки  $\hat{y}(t-1)$ .

В этом случае систему КУ можно дополнить уравнениями динамики для измеренных параметров:

$$\Delta_i(t) = \bar{y}_i(t) - \bar{y}_i(t-1) \quad (11)$$

либо

$$v_i(t) = \bar{y}_i(t) - \hat{y}_i(t-1) \quad (12)$$

и сформулировать для поиска ошибочных ТИ еще одно логическое правило.

6) Если предположить, что в  $j$ -е КУ с большой невязкой в момент времени  $t$   $w_{kj}(t)$  входит только одно измерение  $\bar{y}_i(t)$ , содержащее грубую ошибку, то с большой вероятностью величина  $\Delta_i(t)$  или  $v_i(t)$  будет совпадать с невязкой.

Выполним для уравнений  $w_{kj}(t)$  и (10) процедуру, описанную в п.5 приведенного выше алгоритма, состоящую в данном случае в исключении измерения  $\bar{y}_i(t)$  из системы КУ и проверим условие (10) для вновь полученного уравнения:

$$w'_{kj}(t) = \left| w_{kj}(t) - \Delta_i(t) \right| < d'_{kj}. \quad (13)$$

Если условие (13) выполняется, то измерение  $\bar{y}_i(t)$  считается ошибочным и заменяется на величину  $\bar{y}_i(t-1)$  или  $\hat{y}_i(t-1)$ . Нетрудно показать, что величина  $w'_{kj}(t)$  равна невязке  $j$ -го КУ, вычисленной при замене попавшего под "подозрение" измерения  $\bar{y}_i(t)$  на его предшествующее значение или оценку.

При вычислении  $d'_{kj}$  в (13) также сохраняется методика вычисления  $d_k$  в (6), при этом лишь дисперсия измерения, заменяемого на его прогноз или оценку, заменяется на элемент соответствующей ковариационной матрицы.

В результате применения указанных логических правил все измерения делятся на 4 группы:

- 1) достоверные;
- 2) плохие, измеренные значения которых заменены на вычисленные;

3) сомнительные - измерения, вошедшие только в КУ с большими невязками, но такие, что вычислить их оценки по данным достоверных измерений не удается (например, их число больше числа КУ, в которые они входят);

4) непроверенные - это измерения, не вошедшие в КУ, которые в теории наблюдаемости ЭЭС получили название критических [3].

Следует отметить, что эффективность методов достоверизации ТИ во многом зависит от особенностей каждой конкретной энергосистемы, в основном от количества и размещения измерений в схеме. В ряде случаев низкая избыточность измерений не позволяет получить однозначное решение. Так например, при применении приведенных выше логических правил может возникнуть ситуация, когда одно и тоже измерение входит одновременно в КУ с большой и с малой невязкой. Кроме того, после достоверизации ТИ по КУ остаются две нерешенные проблемы: это непроверенные ТИ и ТИ, входящие в группы сомнительных данных.

Это приводит к необходимости привлекать опыт специалистов - экспертов, что не всегда приемлемо при решении задачи ОС в реальном времени. Поэтому в настоящее время ведутся разработки по применению методов искусственного интеллекта (ИИ) для повышения эффективности алгоритмов достоверизации ТИ по КУ, к которым относятся искусственные нейронные сети (ИНС) и генетические алгоритмы (ГА).

### *3. Применение ГА и ИНС для достоверизации ТИ по контрольным уравнениям*

При расчете схем большой размерности применение приведенного выше алгоритма достоверизации, построенного на логических правилах приводит к необходимости перебора большого числа комбинаций правильных и ошибочных ТИ, требующей больших затрат времени. Отсюда появилась идея использования генетических алгоритмов для идентификации плохих данных в методе КУ.

Применение ГА позволяет полностью заменить процедуру использования логических правил формальной процедурой поиска оптимального решения среди решений, содержащих различные варианты достоверных и ошибочных ТИ.

*Генетические алгоритмы* (ГА) это один из наиболее популярных в настоящее время эвристических методов поиска оптимальных решений, построенный на принципах эволюционной теории в природе[4].

Сущность ГА состоит в представлении решения строками бит (1 и 0), длина которой равна количеству обрабатываемых измерений. Нули соответствуют ошибочным измерениям, единицы - правильным. Первоначально набор решений или исходная популяция генерируется случайным образом, а затем преобразуются с помощью трех базовых операций – отбора, скрещивания и мутации до тех пор, пока не будет получено оптимальное решение.

При работе алгоритмов достоверизации ТИ возможны следующие неправильные решения: пропуск ошибочного измерения в задачу ОС; браковка достоверного измерения вместо ошибочного; признание ошибочным достоверного измерения, как правило, локализованного вблизи ошибочного ТИ и входящего в одно КУ, вместе с ошибочным (группы сомнительных данных).

Для оценки эффективности работы ГА были проведены сопоставительные расчеты по обнаружению грубых ошибок в ТИ с помощью алгоритма логических правил и ГА для различных тестовых схем. Набор правильных и ошибочных ТИ моделировался в имитационном эксперименте, т.е. был известен заранее. Результаты расчетов показали, что пропуск грубых ошибок в задачу ОС при использовании ГА происходит на 20-50% реже, чем у «логических правил». Количество ложной идентификации верных измерений ниже на 40-60%, сокращается также и количество измерений, входящих в группы сомнительных данных. Растет процент срезов ТИ, в которых все ошибки найдены верно.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения ГА для идентификации ошибочных ТИ. Поэтому в дальнейшем планируется применить полученный опыт и наработки для решения более сложной задачи одновременного обнаружения ошибок в телеизмерениях и телесигналах, учитывающих изменение топологии схемы.

Применение ГА позволяет уменьшить количество неправильных решений при достоверизации ТИ и сократить число групп сомнительных данных, вместе с тем не решает полностью все проблемы. Независимо от метода достоверизации ТИ при решении задачи ОС существует проблема критических или избыточных измерений, не вошедших в КУ.

Для поиска ошибочных ТИ среди измерений, не вошедших в КУ, можно использовать корреляционные зависимости между этими ТИ и прошедшими достоверизацию по КУ. В [5] для решения аналогичной задачи предлагалось использовать регрессионные уравнения. При этом коэффициенты регрессии определялись в результате анализа ретроспективных данных, а при функционировании комплекса ОС в реальном времени возникала проблема их контроля и коррекции.

Наиболее просто алгоритм проверки критических ТИ с помощью корреляционного анализа между измеряемыми переменными с учетом меняющихся статистических зависимостей в режиме реального времени реализуется с помощью *искусственных нейронных сетей* [6].

Задача проверки критических измерений по достоверным с помощью ИНС решается в два этапа: во-первых, измерения классифицируются в зависимости от значимости коэффициентов корреляции между ними. Классификация измерений осуществляется с помощью самоорганизующихся карт Кохонена. В процессе классификации измерения, имеющие сильные корреляционные связи, объединяются в один класс.

Затем строятся корреляционные таблицы для классов, в которых присутствуют критические измерения. В результате анализа коэффициентов корреляции выбирается одно из достоверных измерений, по значениям которого формируется задачник для обучения многослойного линейного персептрона (МЛП). В процессе обучения МЛП обучается прогнозировать значение критического измерения по достоверному. Если поступившее значение критического ТИ существенно отличается от прогноза, то такое ТИ объявляется ошибочным и заменяется на прогноз.

Классификация измерений и анализ коэффициентов корреляции выполняется вне реального времени по данным ТИ из архива системы SCADA. Затем для каждого критического измерения формируется, обучается и тестируется своя ИНС также вне реального времени. Обученные ИНС записываются на диск и хранятся сколько угодно долго. При необходимости проверить критическое измерение нужная ИНС активизируется и, по предъявленному ей значению достоверного ТИ практически мгновенно выдает результат, т.е. прогнозируемое значение критического ТИ.

Так как статистические характеристики реальных процессов не могут оставаться неизменными, то прежде, чем активизировать сеть рекомендуется проверить ее адекватность текущему режиму. Это делается с помощью карт Кохонена. Принадлежность обоих параметров режима (критического измерения и измерения, по которому оно прогнозируется) к тому же классу, что и раньше, означает соответствие сети текущему режиму. В противном случае, рекомендуется заново провести корреляционный анализ данных. Если делать это с определенной периодичностью, то сеть все время будет соответствовать текущему режиму.

Предложенная методика была проверена на реальных данных и показала хорошие результаты.

Таким образом, использование методов искусственного интеллекта в сочетании с методом достоверизации ТИ по КУ позволяет повысить эффективность этого метода и надежность получаемого при ОС решения.

#### 4. Литература

1. Гришин Ю.А., Колосок И.Н., Коркина Е.С., Эм Л.В., Орнов В.Г, Шелухин Н.Н. Программно-вычислительный комплекс «Оценка» оценивания состояния ЭЭС в реальном времени. - Электричество. -1999.- №2., С. 8-16.
2. А.З. Гамм, И.Н. Колосок. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах. Новосибирск: Наука, 2000. - 152с.
3. Гамм А.З., Голуб И.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем. - М.: Наука, 1990. - 220 с.
4. Курейчик В.В. Эволюционные методы решения оптимизационных задач. – Таганрог: ТГРУ, 1999.– 115с.
5. Герасимов Л.И. Корреляционный метод достоверизации измерений перетоков в реальном времени. // Информационное обеспечение диспетчерского управления в электроэнергетике, – Новосибирск.: Наука, 1985. –С.80–90.
6. Колосок И.Н., Глазунова А.М. Достоверизация телеизмерений в ЭЭС с помощью искусственных нейронных сетей // Электричество. – 2000. - №10, С. 18-24.