



Влияние весовых коэффициентов измерений на согласованность результатов оценивания состояния и расчета установившегося режима электроэнергетической системы

© А.М. Глазунова, И.Н. Колосок

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

Резюме: Цель исследований – разработка метода настройки процедуры оценивания состояния электроэнергетической системы, направленного на повышение качества оценивания состояния путем корректировки весовых коэффициентов измерений. Для решения поставленной задачи используются методы нелинейной оптимизации. Формирование контрольных уравнений и решение системы линейных уравнений при оценивании состояния выполняются методом Краута. Результаты расчета электроэнергетического установившегося режима рассматриваются в качестве эталона. Чем меньше полученные оценки отличаются от результатов расчета установившегося режима, тем выше точность процедуры оценивания состояния. Задача корректировки весовых коэффициентов поставлена и решена как задача нелинейной оптимизации, где в качестве параметров оптимизации принимаются дисперсии измерений. Разработана целевая функция, которая формулируется следующим образом: минимизировать дисперсии оценок измерений, входящих в одно контрольное уравнение, за счет максимизации дисперсий измерений активной мощности в балансирующем узле расчетной схемы электроэнергетической системы. При решении этой задачи контролируются ограничения в виде равенств и неравенств. Задача оптимизации дисперсий решается после первой итерации оценивания состояния, и, начиная со второй итерации, оценивание состояния выполняется с новыми весовыми коэффициентами измерений. Расчеты выполнены на 6-узловой тестовой схеме. Из существующих измерений составляются контрольные уравнения. Данные, относящиеся к измерениям выбранного контрольного уравнения тестовой схемы, используются для расчета целевой функции. Корректность перераспределения дисперсий и их экстремальные значения контролируются ограничениями. Полученные результаты показали, что при корректировке дисперсий измерений оценки мощности во всех узлах становятся ближе к расчету установившегося режима.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, оценивание состояния, весовые коэффициенты, нелинейная минимизация, параметры установившегося режима

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00322.

Для цитирования: Глазунова А.М., Колосок И.Н. Влияние весовых коэффициентов измерений на согласованность результатов оценивания состояния и расчета установившегося режима электроэнергетической системы. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 172–182. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-172-182>

Influence of the weight coefficients of measurements on the consistency of the assessment and calculation results of the power supply system steady-state operation conditions

Anna M. Glazunova, Irina N. Kolosok

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim of this work is to develop an improved procedure for assessing the state of power supply systems based on adjusting the weight coefficients of measurements. To this end, non-linear optimisation methods were used. The control equations and the solution of the simultaneous linear equations were performed using the Crout method. The results of the calculation of the electrical power steady-state mode were considered as a reference. The lower the difference between the evaluation and steady-state calculation results, the higher the accuracy of the overall state assessment procedure. The problem of correcting the weight factors is set and solved as a nonlinear optimisation problem,

where the optimisation parameters are taken as the dispersion of the measurements. The objective function was formulated as follows: to minimise the measurement evaluation dispersions that are part of a single control equation by maximising the active power measurements dispersion in the swing bus of the power supply system. In this study, limitations in the form of equation and inequality are monitored. The problem of optimising the dispersions is solved after the first iteration of the state assessment; starting with the second iteration, the state assessment is performed with new measurement weight factors. The calculations were performed on a 6-node test circuit. The control equations are drawn from the current measurements. The measurements data on the selected control equation of the test circuit are used to calculate the target function. The accuracy of the dispersions redistribution and their extreme values are controlled by the limitations. The results showed that, when adjusting the dispersion of measurements, the power assessments at all nodes are closer to the steady-state mode calculation results.

Keywords: electric power grid, state estimation, weighting coefficients, nonlinear minimization, steady-state parameters

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the state assignment project (no. FWEU-2021-0001) of the fundamental research program of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030 and with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project no. 19-07-00322.

For citation: Glazunova AM, Kolosok IN. Influence of the weight coefficients of measurements on the consistency of the assessment and calculation results of the power supply system steady-state operation conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):172–182. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-172-182>

ВВЕДЕНИЕ

Расчет текущего установившегося режима по заданным или измеренным параметрам режима является ключевой функцией комплекса задач оперативного и противоаварийного управления электроэнергетической системы (ЭЭС) [1]. Основными методами, используемыми для расчета текущего режима ЭЭС, являются методы расчета установившегося режима (УР) и методы оценивания состояния (ОС). Далее рассмотрены основные сходства и различия между задачей ОС и расчетом УР. При решении обеих задач используется одна и та же схема замещения сети и одна и та же математическая модель ЭЭС, записанная в виде уравнений потоко-распределения, удовлетворяющих законам Ома и Кирхгофа для электрической сети. Результатом решения обеих задач является расчетная модель ЭЭС.

Основное различие состоит в требуемом объеме измерительной информации. Для расчета УР необходимо, чтобы по имеющимся измерениям можно было рассчитать вектор зависимых параметров режима, обычно это комплексы узловых напряжений во всех узлах (кроме балансирующих) и инъекции мощностей в балансирующих узлах. В качестве измерений в задаче расчета УР используются значения узловых инъекций активной, реактивной мощностей и напряжения в ба-

лансирующих узлах. Теория и методы расчета УР начали разрабатываться достаточно давно – в середине прошлого века [2, 3], когда еще не было телеметрии, поэтому для задания этих параметров использовались данные контрольных замеров, скорректированные с учетом даты выполнения расчетов, данные суточной ведомости и другая подобная информация.

С созданием автоматизированной системы диспетчерского управления в 70-х годах прошлого века и с внедрением телеметрии [4] появились измерения различных параметров режима ЭЭС: перетоки активной, реактивной мощностей, токи в линиях, модули узловых напряжений, мощности генерирующих источников и т.д. Наличие возможности использовать различные измерения для расчета текущего режима ЭЭС привело к развитию методов ОС [5, 6]. При ОС вектор параметров режима, по которому вычисляются все остальные параметры режима, получил название вектора состояния: $x = \{U, \delta\}$, его размерность равна $2n-1$, где n – количество узлов в расчетной схеме. Минимально необходимый набор измерений, необходимый для расчета всех компонент вектора состояния, называется базисным. Несмотря на то, что в этих условиях для расчета УР появилась возможность частично использовать телеизмерения, расчет по базисным измерениям не



позволяет отфильтровать погрешности и обнаружить ошибочные измерения, что при плохом качестве измерений может привести к заметному искажению расчетных параметров режима.

Оценивание состояния – одна из основных задач подсистемы оперативного управления режимами, используемая для расчета текущего режима ЭЭС по данным измерений. В качестве измерений при решении задачи ОС используются телеизмерения (ТИ) и телесигналы, поступающие от SCADA-систем (от англ. Supervisory Control And Data Acquisition – система диспетчерского контроля и сбора данных реального времени), и измерения комплексных электрических величин от устройств синхронизированных векторных измерений (СВИ) – измерительного оборудования системы мониторинга переходных режимов [7]. При решении задачи ОС, как правило, присутствует «избыточность» измерений, это означает, что количество используемых измерений больше базисного, и оно позволяет отфильтровать погрешности измерений, обнаружить в них грубые ошибки, в результате чего полученный расчетный режим точнее отражает текущее состояние ЭЭС.

Одним из первых методов, предложенных для решения задачи ОС, был метод взвешенных наименьших квадратов [8, 9]. Для реализации этого метода требуется задавать весовые коэффициенты измерений. Появившиеся позже методы – метод наименьших модулей [10], методы робастного ОС [11, 12] – также требуют задания весовых коэффициентов.

В одной из первых монографий по ОС [13] весовые коэффициенты трактовались как степень «доверия» к измерениям и определялись эмпирически, исходя из данных о практическом использовании измерений. С появлением информации о погрешностях ТИ весовые коэффициенты стали задавать равными обратным дисперсиям измерений значениями, принимая закон о нормальном распределении погрешностей. Данные о точности измерений, как правило, неизвестны или задаются приближенно, исходя из номинальных метрологических характеристик измери-

тельного тракта. Они могут изменяться в реальных условиях, поэтому были разработаны алгоритмы идентификации дисперсий измерений, позволяющие уточнить их при функционировании задачи ОС в циклическом режиме [14].

Еще одно различие между задачами расчета УР и ОС состоит в задании балансирующих узлов. В задаче расчета УР балансирующие узлы – это узлы, в которых остаются постоянными фаза или/и модуль напряжения, а небалансы (активные и реактивные), возникающие, например, из-за плохого исходного приближения, распределяются между балансирующими узлами. В задаче ОС балансирующие узлы не задаются, для фиксации степеней свободы задается базисный узел, в котором фиксируется фазовый угол напряжения, поэтому количество компонент вектора состояния равно $2n-1$, а погрешности измерений узловых инъекций распределяются между всеми параметрами режима в соответствии с весовыми коэффициентами. При изменении весовых коэффициентов изменяются величины параметров режима, полученные в результате ОС. При этом важны не сами значения весовых коэффициентов, а их соотношения: чем выше коэффициент измеренного параметра режима по сравнению с весовыми коэффициентами других измерений, тем ближе оценка этого параметра к самому измерению, и наоборот. Таким образом можно добиться высокой точности оценок наиболее ответственных параметров режима, например, перетоков по межсистемным связям, или фиксировать значения абсолютно точных параметров, задавая им нулевые или очень малые дисперсии.

В практике диспетчерского управления нередко возникают ситуации, когда требуется максимальное совпадение результатов ОС, полученных при обработке избыточного набора измерений, и результатов расчета УР. В данной работе для достижения этой цели предложен алгоритм настройки весовых коэффициентов при решении задачи ОС методом контрольных уравнений [15].

Целью данной работы является исследование возможности получения результатов оценивания состояния идентичных результа-

там расчета УР за счет регулирования весовых коэффициентов измерений.

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Вычисления параметров установившегося режима ЭЭС выполняются двумя методами:

- расчет потокораспределения, когда в качестве независимых переменных во всех узлах, кроме балансирующих, используются инъекции (детерминированная информация);
- оценивание состояния, когда в качестве независимых переменных используются измерения (стохастическая информация).

Как правило, результаты, полученные по двум методам, не совпадают друг с другом. Одной из причин этого является разный характер исходной информации (детерминистический и стохастический). При внедрении в ЭЭС датчиков синхронизированных векторных измерений (СВИ), а также при повышении точности измерений SCADA качество стохастической информации приближается к детерминистической, и при отсутствии избыточных измерений данный аргумент перестает быть решающим. В настоящее время существует много работ, посвященных проблеме повышения точности результатов ОС за счет совместного использования измерений SCADA-системы и векторных измерений [16, 17]. Кроме этого, для улучшения качества ОС разрабатываются методы обнаружения ошибочных данных [18, 19].

Другой причиной несовпадения результатов является разный смысл балансирующих узлов. В задаче ОС балансирующий узел – это узел, в котором остаются постоянными модуль и фаза напряжения, а погрешности измерений распределяются между всеми параметрами режима в соответствии с весовыми коэффициентами. При расчете УР балансирующими узлами являются узлы, в которых остаются постоянными фаза или/и модуль напряжения, а небалансы распределяются между балансирующими узлами.

В ЭЭС выделяются электрические станции, которые отвечают за баланс мощности в системе, и при расчете УР обычно эти узлы назначаются балансирующими. Поэтому распределение мощностей, требующихся для сохранения балансов в системе, в зада-

че расчета УР представляется более правильным.

В работе выполняется сравнительный анализ параметров установившегося режима, полученных разными методами при прочих равных условиях. Под равными условиями понимается использование одинаковых исходных данных: параметров схемы замещения, параметров режима. В качестве независимых переменных (инъекций) в задаче расчета УР принимаются измерения инъекций, полученные от SCADA-системы и СВИ.

ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ С КОРРЕКТИРОВКОЙ ПОЛУЧЕННЫХ ОЦЕНОК

На рис. 1 показана укрупненная блок-схема решения задачи ОС с корректировкой полученных оценок. Сначала формируются вектор измерений, матрица весовых коэффициентов и другие данные, необходимые для ОС. По окончании формирования требующихся данных начинается процесс ОС, где после первой итерации вычисляются коэффициенты линеаризации и невязки контрольных уравнений. Эти данные используются для формирования целевой функции (критерия оптимизации) и ограничений. Следующим шагом алгоритма является решение задачи оптимизации дисперсий измерений. По получению результатов оптимизации процесс ОС продолжается с новыми значениями весовых коэффициентов.

Решение данной задачи может быть представлено тремя блоками:

1. Подготовка исходной информации.
2. Оптимизация весовых коэффициентов измерений с целью получения желаемого режима.
3. Оценивание состояния.

Подготовка исходной информации. В данной работе под подготовкой исходной информации понимается *формирование информации о параметрах режима*, которая в задаче оценивания состояния представляется в виде вектора измерений:

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



Рис. 1. Укрупненная блок-схема
Fig. 1. Enlarged block diagram

где U_i – модуль напряжения; P_i , Q_i – инъекции активных и реактивных мощностей в узлах; P_{ij} , Q_{ij} – перетоки мощностей в трансформаторах и линиях; δ_i – фазы напряжений в тех узлах схемы, где установлены регистраторы СВИ.

Вычисление невязок контрольных уравнений. Задача ОС решается методом контрольных уравнений, где для решений систем нелинейных и линейных уравнений применяются методы Ньютона и Краута. Процесс формирования КУ основан на теореме о единственности представления каждого вектора n -мерного пространства E_n в виде линейной комбинации векторов базиса [20]. В результате преобразования прямо-

угольной матрицы Якоби (Н) методом Краута все измерения делятся на избыточные и базисные. Избыточные измерения представляются в виде комбинации базисных измерений, поэтому все базисные измерения входят во все КУ с разными коэффициентами линеаризации. Эта особенность формирования КУ используется при формировании критерия оптимизации для решения поставленной задачи.

Вычисление коэффициентов линеаризации. Коэффициент для i -го измерения вычисляется по формуле:

$$a_i = \frac{\partial w_k}{\partial y_i}, \quad (2)$$

где k – номер КУ.

Процесс вычисления невязок КУ и коэффициентов линеаризации подробно описан в [15].

Оптимизация дисперсий измерений. Целевая функция в задаче оптимизации формулируется следующим образом: минимизировать дисперсии оценок измеренных параметров режима, объединенных одним КУ, за счет максимизации дисперсии измерения активной мощности в балансирующем узле при ограничениях в виде равенств и неравенств. Для представления целевой функции в математическом виде применяется правило, которое гласит, что дисперсия КУ равна сумме дисперсий измерений, входящих в данное КУ с учетом коэффициентов линеаризации [15].

Целевая функция записывается следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{n-1} a_i^2 \sigma_i^2 - a_b^2 \sigma_b^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где n – число измерений в КУ; $a_i = \frac{\partial w}{\partial y}$ – коэффициент линеаризации; b – балансирующий узел.

Ограничение в виде равенства отвечает за соблюдение границы величины дисперсии КУ с учетом коэффициента линеаризации и имеет вид:

$$\sigma_{i(o)}^2 a_i (\sum_{j=1}^m \sigma_{j(o)}^2 a_j^2)^{-1} - B_{KY} = 0, \quad (4)$$

где m – количество измерений в КУ; $\sigma_{i(o)}^2$ – результат оптимизации; B_{KY} вычисляется по первому слагаемому (4) при заданных значениях дисперсий. Первое слагаемое уравнения (4) является частью формулы, выведенной в [15] для вычисления оценок, и отвечает за пропорции, по которым распределяется невязка КУ между измерениями.

Ограничения в виде неравенств накладываются на параметры оптимизации:

$$0 \leq \sigma_i^2 \leq \sigma_{raw(i)}^2; \quad (5)$$

$$0,5\sigma_{raw(b)}^2 \leq \sigma_b^2 \leq \sigma_{raw(b)}^2, \quad (6)$$

где $\sigma_{raw(i)}^2$ – заданная дисперсия i -го измерения;

$\sigma_{raw(b)}^2$ – заданная дисперсия измерения мощности в балансирующем узле.

Результатом решения этой задачи являются новые значения весовых коэффициентов измерений.

Решение задачи оценивания состояния. Задача ОС решается с весовыми коэффициентами измерений, вычисленными в процессе оптимизации.

КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА РЕЗУЛЬТАТОВ

Для сравнительного анализа результатов разработаны формулы, которые показывают точность оценок, полученных в процессе ОС и ОС с корректировкой результатов. В качестве эталона рассматриваются истинные значения параметров режима (результат УР).

Отклонения оценок от истинных значений вычисляются по формуле:

$$err_i^{(И(K))} = y_{ист(i)} - \hat{y}_{(i)}, \quad (7)$$

где индекс И (К) указывает, что значения отклонений вычисляются для ОС и для ОС с корректировкой весовых коэффициентов измерений.

Среднее значение отклонений вычисляется по формуле:

$$E_{sum}^{(И(K))} = \sum_i^n (err_i) / n, \quad (8)$$

где n – количество узлов.

Показатель повышения точности результатов ОС с корректировкой вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{OC} = E_{sum}^И - E_{sum}^K. \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходная информация и алгоритм решения. Исследования проводились на 6-узловой схеме (рис. 2) с разным составом измерений. В работе рассмотрены два сценария. В обоих сценариях балансирующим узлом является узел номер 6. Количество параметров оптимизации равно 11.

Целью исследования является определение максимальной точности оценок инъекций

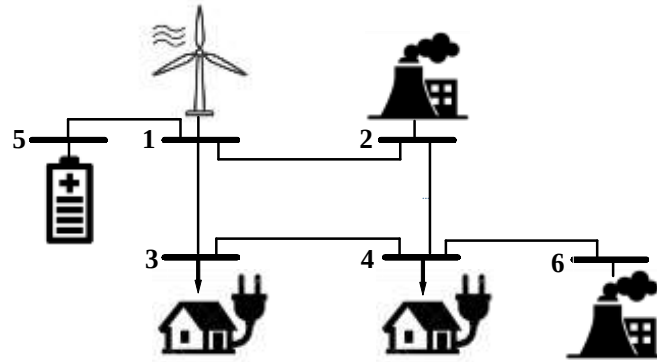


Рис. 2. Тестовая схема
Fig. 2. Test circuit

во всех узлах за счет корректировки весовых коэффициентов измерений. При этом погрешность оценки всех измеренных параметров режима не должна превышать погрешности измерительного тракта.

Сценарий 1. Исходная информация – это измерения 12 параметров режима: $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$. В данном случае два измерения избыточные, что позволяет сформировать два КУ.

В процессе линеаризации нелинейных уравнений по методу Краута избыточными измерениями оказываются P_5, Q_1 . Для решения задачи оптимизации весовых коэффициентов используется КУ № 1, в которое входит измерение инъекции активной мощности P_5 .

Сценарий 2. Исходная информация – это измерения 16 параметров режима: $U_1, U_3, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_{1-2}, P_{4-3}$. В данном случае шесть измерений являются избыточными, что позволяет сформировать шесть КУ.

В процессе линеаризации нелинейных уравнений по методу Краута избыточными измерениями оказываются $P_1, P_4, P_{4-3}, Q_1, Q_3, Q_4$. Для решения задачи оптимизации весовых коэффициентов используется КУ № 2, в которое входит измерение инъекции активной мощности P_4 .

Задача корректировки весовых коэффициентов решается по следующему алгоритму:

1. Выбирается КУ, в которое входит наибольшее количество измерений активной мощности в узлах, включая измерение инъекции в балансирующем узле.

2. Составляется целевая функция из данных, характеризующих измерения выбранного КУ. Целевая функция имеет вид для сценария 1:

$$\sum_2^n a_{Q(i)}^2 \sigma_{Q(i)}^2 + a_{P2}^2 \sigma_{P2}^2 + a_{P3}^2 \sigma_{P3}^2 + a_{P4}^2 \sigma_{P4}^2 + a_{P5}^2 \sigma_{P5}^2 - a_{P6}^2 \sigma_{P6}^2 + a_{P1}^2 \sigma_{P1}^2 \rightarrow \min. \quad (10)$$

Для сценария 2:

$$\sum a_{Q(i)}^2 \sigma_{Q(i)}^2 + \sum a_{U(l)}^2 \sigma_{U(l)}^2 + \sum a_{P(j)}^2 \sigma_{P(j)}^2 + a_{P2-4}^2 \sigma_{P2-4}^2 - a_{P6}^2 \sigma_{P6}^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $i = 2, 5, 6; l = 1, 3; j = 1, 2, 3, 5$.

3. Вычисляется $B_{КУ}$.

4. Формируются ограничения. Ограничение в виде равенства имеет вид (4), где i – это номер измерения в КУ; j – это номера измерений, входящих в КУ. Например, для P_6 ограничение (4) имеет вид:

$$\sigma_{6(o)}^2 a_6 (\sum_{j=1}^m \sigma_{j(o)}^2 a_j^2)^{-1} - B_{КУ} = 0, \quad (12)$$

где $j = 1 \div 11$.

Ограничения в виде неравенств (6) учитываются при задании условий для параметров оптимизации. Задаются минимальные и максимальные значения дисперсий.

5. Решается задача оптимизации с помощью имеющегося в MATLAB приложения `fmincon`.

Полученные результаты. В табл. 1 показаны значения параметров оптимизации до и после оптимизации для сценария 1. В первой строке записаны дисперсии измерений

Таблица 1. Параметры оптимизации (сценарий 1)
Table 1. Optimization parameters (Scenario 1)

Измерение	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	P_1	P_2	P_3	P_4	P_6
До оптимизации	5	5	5	5	5	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
После оптимизации	1,7	1,8	1,7	1,7	1,7	0,4	0,4	0,4	0,4	5

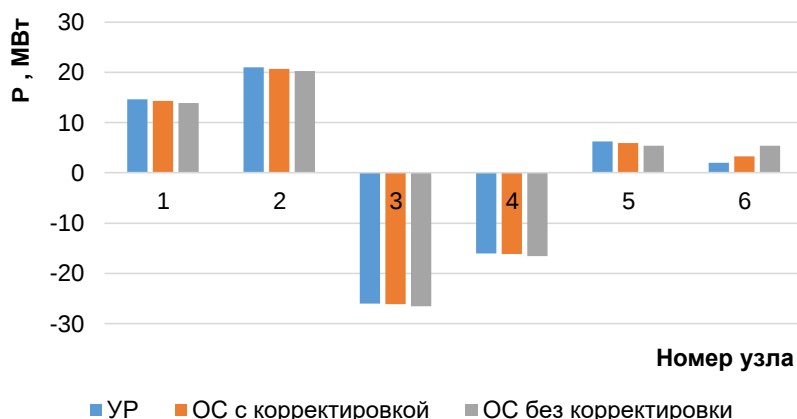


Рис. 3. Значения активных мощностей в трех режимах (сценарий 1)
Fig. 3. Active power values in three modes (Scenario 1)

КУ до оптимизации, во второй строке представлены результаты оптимизации.

На рис. 3 показаны значения активных мощностей в трех режимах: УР, ОС с коррективкой, ОС без коррективки.

Анализ результатов, представленных в табл. 1 и на рис. 3 показывает, что при увеличении дисперсии измерения в балансирующем узле оценки мощности во всех узлах становятся точнее. Это доказывает, что при задании весовых коэффициентов важным является не абсолютное значение коэффициентов, а их соотношения.

В табл. 2 показаны значения отклонений активных мощностей от истинных значений, вычисленные по (7) без и с коррективкой весовых коэффициентов измерений.

Таблица 2. Значения отклонений без и с коррективкой весовых коэффициентов
Table 2. Deviation values without and with weighting coefficient adjustment

Номер узла	Без коррективки	С коррективкой
1	-0,7794	-0,3187
2	-0,5129	-0,3105
3	-0,7599	-0,2196
4	-0,5498	-0,2305
5	-0,7881	-0,2417
6	3,3409	1,2757

В табл. 3 показаны средние значения отклонений, вычисленные по (8), и показатель $\varphi_{ур}$.

Таблица 3. Средние значения отклонений
Table 3. Average deviation values

Номер узла	Без коррективки	С коррективкой	$\varphi_{ур}$
Сценарий 1	1,1218	0,4326	0,69
Сценарий 2	1,14	1,09	0,05

Из табл. 2, 3 видно, что:

- 1) после коррективки весовых коэффициентов отклонения становятся меньше;
- 2) для сценария 1, когда измерения активной мощности во всех узлах входят в целевую функцию, $\varphi_{ур}$ больше, чем для сценария 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены вопросы повышения точности результатов ОС за счет подбора весовых коэффициентов измерений. Описана особенность формирования контрольных уравнений в задаче оценивания состояния ЭЭС, где для решения системы линейных уравнений используется метод Краута. Показано, что при наличии измерений актив-



ной и реактивной мощности во всех узлах и при отсутствии других измерений все измерения объединяются двумя КУ. Использование КУ, объединяющего измерения активной мощности во всех узлах, упрощает регулирование соотношений между весовыми коэффициентами этих измерений, так как изменение одного весового коэффициента влияет на точность оценок практически всех измерений.

Предложен метод увеличения точности результатов оценивания состояния ЭЭС, основанный на оптимальном подборе весовых коэффициентов измерений. Разработаны

целевая функция и ограничения для оптимизации дисперсий измерений.

Выполнены расчеты на 6-узловой тестовой схеме по двум сценариям, которые отличаются друг от друга составом измерений. Выполненные расчеты показывают, что при использовании КУ, объединяющего измерения активной мощности во всех узлах, оценки инъекции активной мощности становятся точнее на 0,69 МВт. Использование КУ, объединяющего разные измерения, повышает точность оценок инъекции активной мощности на 0,05 МВт.

Список литературы

1. Аюев Б.И., Машалов Е.В., Неуймин В.Г., Шубин Н.Г. Основные технологические задачи Системного оператора // Вестник Уральского государственного технического университета. 2004. Т. 12. № 42. С. 27–30.
2. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 190 с.
3. Крумм Л.А. Методы приведенного градиента при управлении электроэнергетическими системами. Новосибирск: Изд-во «Наука», 1977. 368 с.
4. Лисицын Н.В., Морозов Ф.Я., Окин А.А., Семенов В.А. Единая энергосистема России. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 282 с.
5. Schweppe F.C., Wildes J. Power system static-state estimation. Part I: Exact Model // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1970. Vol. PAS-89. Iss. 1. P. 120–125. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1970.292678>
6. Гамм А.З. Оценка текущего состояния электроэнергетической системы как задача нелинейного программирования // Электричество. 1972. № 9. С. 1–7.
7. 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. 41–49.
8. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976. 220 с.
9. Abur A., Exposito A.G. Power system state estimation – theory and implementation. Part 2. New York: Marcel Dekker, 2004. P. 9–26.
10. Abur A., Celik M.K. A fast algorithm for the weighted least absolute value state estimation // IEEE Power Engineering Review. 1991. Vol. 11. Iss. 2. P. 41. <https://doi.org/10.1109/MPER.1991.88711>
11. Mili I., Cheniae M.G., Vichare N.S., Rousseeuw P.J. Robust state estimation based on projection statistics (of power systems) // IEEE Transactions on Power Systems. 1996. Vol. 11. Iss. 2. P. 1118–1127. <https://doi.org/10.1109/59.496203>
12. Хохлов М.В. Пороговые свойства робастного оценивания состояния электроэнергетических систем // Электричество. 2010. № 4. С. 2–12.
13. Гамм А.З., Герасимов Л.Н., Гришин Ю.А., Колосок И.Н. Оценивание состояния в электроэнергетике / под ред. Ю.Н. Руденко. М.: Изд-во «Наука», 1983. 320 с.
14. Гамм А.З., Глазунова А.М., Колосок И.Н., Овчинников В.В. Методы оценки дисперсий телеизмерений в электроэнергетических системах // Электричество. 1997. № 7. С. 2–9.
15. Гамм А.З., Колосок И.Н. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах / отв. ред. В.И. Зоркальцев. Новосибирск: Изд-во «Наука», 2000. 152 с.
16. Rathod N., Patel H., Joshi S. Implementing two stage hybrid state estimation with various approaches // International Conference on Smart Grids and Energy Systems (Perth, 23–26 November, 2020). Perth: IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/SGES51519.2020.00117>
17. Massignan J.A.D., London J.B.A., Maciel C.D., Besani M. PMUs and SCADA measurements in power system state estimation through Bayesian inference // IEEE Milan PowerTech (Milan, 23–27 June 2019). Milan: IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810750>
18. Ren P., Abur A. Modification of boundary zone measurements to avoid spreading of errors // IEEE Eindhoven PowerTech (Eindhoven, 29 June – 2 July 2015). Eindhoven: IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232282>
19. Glazunova A., Kolosok I., Semshchikov E. Bad data detection by dynamic state estimation for the case of low redundancy of measurements // Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (13–16 May 2014). Cavtat: IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2014.6850459>
20. Демидович Б.П., Марон И.А., Основы вычислительной математики. М.: Изд-во «Наука». Главная ред. физ.-мат. лит.-ры, 1966. 658 с.

References

1. Ayuev BI, Mashalov EV, Neujmin VG, Shubin NG. Main technological tasks of system operator. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2004;12(42):27–30. (In Russ.)
2. Idel'chik VI. *Calculations and optimization of modes of electrical networks and systems*. Moscow: Energoatomizdat; 1988, 190 p. (In Russ.)
3. Krumm LA. *Reduced gradient methods for electric power system control*. Novosibirsk: Nauka; 1977, 368 p. (In Russ.)
4. Lisicyn NV, Morozov FYa, Okin AA, Semenov VA. *Unified energy system of Russia*. Moscow: National Research University; 1999, 282 p. (In Russ.)
5. Schweppe FC, Wildes J. Power system static-state estimation. Part I: Exact Model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1970;PAS-89(1):120–125. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1970.292678>
6. Gamm AZ. *Estimation of electric power system current state as a nonlinear programming problem*. *Elektrichestvo*. 1972;9:1–7. (In Russ.)
7. Gamm AZ, Glazunova AM, Grishin YuA, Kolosok IN, Korkina ES. Development of assessment algorithms for electric power system state. *Elektrichestvo*. 2009;6:41–49. (In Russ.)
8. Gamm AZ. *Statistical methods for assessing the state of electric power systems*. State Moscow: Nauka; 1976, 220 p. (In Russ.)
9. Abur A, Exposito AG. *Power system state estimation – theory and implementation*. Part 2. New York: Marchel Dekker; 2004, p. 9–26.
10. Abur A, Celik MK. A fast algorithm for the weighted least absolute value state estimation. *IEEE Power Engineering Review*. 1991;11(2):41. <https://doi.org/10.1109/MPER.1991.88711>
11. Mili I, Cheniae MG, Vichare NS, Rousseeuw PJ. Robust state estimation based on projection statistics (of power systems). *IEEE Transactions on Power Systems*. 1996;11(2):1118–1127. <https://doi.org/10.1109/59.496203>
12. Hohlov MV. Threshold features of robust estimation of electric power system state. *Elektrichestvo*. 2010;4:2–12. (In Russ.)
13. Gamm AZ, Gerasimov LN, Grishin YuA, Kolosok IN. *State assessment in electric power industry* / ed. YuN Rudenko. Moscow: Nauka; 1983, 320 p. (In Russ.)
14. Gamm AZ, Glazunova AM, Kolosok IN, Ovchinnikov VV. Estimation methods of telemetry measurement dispersion in electric power grids. *Elektrichestvo*. 1997;7:2–9. (In Russ.)
15. Gamm AZ, Kolosok IN. *Detection of gross errors of telemetry in electric power grids*. / editor-in-chief VI Zorkaltsev. Novosibirsk: Nauka; 2000, 152 p. (In Russ.)
16. Rathod N, Patel H, Joshi S. Implementing two stage hybrid state estimation with various approaches. In: *International Conference on Smart Grids and Energy Systems* 23–26 November, 2020, Perth. Perth: IEEE; 2020. <https://doi.org/10.1109/SGES51519.2020.00117>
17. Massignan JAD, London JBA, Maciel CD, Bessani M. PMUs and SCADA measurements in power system state estimation through Bayesian inference. In: *IEEE Milan PowerTech*. 23–27 June 2019, Milan. Milan: IEEE; 2019. <https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810750>
18. Ren P, Abur A. Modification of boundary zone measurements to avoid spreading of errors. In: *IEEE Eindhoven PowerTech*. 29 June – 2 July 2015, Eindhoven. Eindhoven: IEEE; 2015. <https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232282>
19. Glazunova A, Kolosok I, Semshchikov E. Bad data detection by dynamic state estimation for the case of low redundancy of measurements. In: *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering*. 13–16 May 2014, Cavtat. Cavtat: IEEE; 2017. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2014.6850459>
20. Demidovich BP, Maron IA. *Fundamentals of computational mathematics*. Moscow: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury; 1966, 658 p. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Глазунова Анна Михайловна,
доктор технических наук, доцент,
старший научный сотрудник
Отдела электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
✉ e-mail: glazunova@isem.irk.ru

Колосок Ирина Николаевна,
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
Отдела электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: kolosok@isem.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna M. Glazunova,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Department
of Electric Power Systems,
Melentiev Institute of Energy Systems SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
✉ e-mail: glazunova@isem.irk.ru

Irina N. Kolosok,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Leading Researcher of the Department of Electric Power
Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: kolosok@isem.irk.ru



Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 22.02.2021; одобрена после рецензирования 25.03.2021; принята к публикации 29.04.2021.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 22.02.2021; approved after reviewing 25.03.2021; accepted for publication 29.04.2021.