

* * *

Алгоритмы распределенного оценивания состояния больших энергосистем¹

КОЛОСОК И.Н., КОРКИНА Е.С., СУХАНОВ О.А.

Представлены алгоритмы оценивания состояния больших электроэнергетических систем (ОС ЭЭС), рассматриваемых как совокупность подсистем, в которых процесс решения общей задачи ОС включает решение задач для каждой из подсистем большой ЭЭС и решение задачи верхнего уровня, в которой определяются значения параметров электрического режима в граничных узлах подсистем. Рассматривается решение задачи обнаружения грубых ошибок в измерениях в подсистемах с помощью метода контрольных уравнений.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, оценивание состояния, контрольные уравнения, распределенные алгоритмы, функциональное моделирование

Происходящие в настоящее время процессы интеграции электроэнергетических систем в большие энергообъединения и создания больших международных электроэнергетических рынков приводят к необходимости развития и совершенствования алгоритмов и информационно-вычислительных технологий, используемых для решения задач расчета, планирования и управления режимами электроэнергетических систем (ЭЭС).

Возможность обеспечения оптимального функционирования больших энергообъединений при сохранении самостоятельного управления режимами в каждой из входящих в них энергосистем возникает

Algorithms for estimating the state of large power systems are presented, in which these systems are regarded as the totality of subsystems, in which the solution of the overall state estimation problem includes solving of problems for each subsystem of the large power system and solving the upper-level problem, in which the parameters of electric operating conditions are determined at the boundary nodes of the subsystems. A solution of the problem of revealing gross errors in the measurements of parameters in subsystems using the method of test equations is considered.

Key words: electric power system, state estimation, test equations, distributed algorithms, functional simulation

в результате создания и применения технологии распределенных расчетов, планирования и управления режимами ЭЭС [1, 2]. В различных своих вариантах данная технология может базироваться на общих принципах метода функционального моделирования (ФМ), сформулированных в [1, 3], или на принципах декомпозиции, представленных в [2, 4].

В статье представлено описание алгоритмов распределенного оценивания состояния (ОС), т.е. алгоритмов, предназначенных для решения задач расчета переменных, представляющих установившийся режим (текущее состояние) ЭЭС по данным измерений, на системе компьютеров, установленных в подсистемах объединенной ЭЭС. Основные из этих алгоритмов реализуют применительно к данному классу задач принципы метода ФМ и общую структуру иерархических алгоритмов ФМ.

¹ Работа выполнена при поддержке ведущей научной школы (грант НШ № 4633.2010.8) и РФФИ (грант № 09-08-91330 ННИО_а).

Методические основы распределенного ОС больших энергосистем. Основным теоретическим представлением, на котором базируется технология распределенного расчета режима ЭЭС, является представление об ЭЭС как о совокупности входящих в нее подсистем. Это, в частности, относится к распределенному ОС больших энергосистем.

В соответствии с этим теоретическим представлением первым этапом формирования модели ЭЭС является выделение подсистем в общей схеме ЭЭС. При рассмотрении каждой подсистемы как части системы, непосредственно примыкающей к другим частям системы (подсистемам), в общей модели системы могут быть выделены граничные узлы, каждый из которых разделяет две примыкающие друг к другу подсистемы, и внутренние узлы, каждый из которых находится внутри одной из подсистем.

Как известно, процедура решения общей задачи ОС для ЭЭС, решаемой на одном компьютере и представляемой в виде единой системы уравнений, строится как последовательность решения следующих задач:

- 1) формирование текущей расчетной схемы ЭЭС по данным телесигнализации (ТС);
- 2) анализ наблюдаемости и введение псевдоизмерений (ПИ);
- 3) выявление грубых ошибок в телеизмерениях (ТИ), т.е. обнаружение плохих данных (ОПД);
- 4) расчет вектора состояния, включающего модуль U и фазы напряжений φ в узлах, удовлетворяющего уравнениям электрической сети и наиболее близкого к вектору измеренных значений параметров режима.

Предположим, что после выделения подсистем (т.е. определения границ подсистем на первом этапе формирования модели ЭЭС в распределенном ОС системы) в общем векторе измерений имеются измерения, позволяющие рассчитать перетоки через граничные узлы, или переменные состояния, относящиеся к граничным узлам. В таком случае каждую из подсистем на последующих этапах ОС будем рассматривать как отдельную систему с заданными переменными состояния в граничных узлах или перетоками мощности через эти узлы. В соответствии с этим решение первых трех задач (в представленной выше процедуре решения общей задачи ОС) выполняется для всех подсистем как для независимо работающих систем в каждом из компьютеров, находящихся в подсистемах энергообъединения, для которого должна быть решена задача ОС.

Последний этап решения задачи ОС, т.е. решение оптимизационной задачи п. 4) в общем алгоритме распределенного ОС заключается в расчете

полного вектора внутренних и граничных переменных состояния, доставляющих минимум принятой целевой функции для системы в целом. В общем случае, когда все данные ТИ, получаемые от системы SCADA, рассматриваются как содержащие погрешности, решение оптимизационной задачи п. 4) может выполняться с помощью иерархических алгоритмов распределенного ОС или с помощью алгоритмов декомпозиции, предназначенных для решения этой задачи. Иерархические алгоритмы, построенные на основе принципов ФМ [1], включают решение ряда задач нижнего уровня (определение внутренних переменных состояния в подсистемах) и задачи верхнего уровня (определение граничных переменных состояния). При этом предполагается, что решение первых трех задач в общей процедуре ОС выполнено в каждой из подсистем предварительно.

Эффективность распределенного ОС в больших ЭЭС может быть значительно повышена при установке в них PMU (Phasor Measurement Units) – современных прецизионных устройств измерения комплексных электрических величин. Наиболее целесообразно устанавливать данные устройства в граничных узлах подсистем. При наличии полного вектора точных измерений, относящихся ко всем граничным узлам подсистем, полная задача п. 4) для всей системы распадается в распределенном ОС на ряд оптимизационных задач, каждая из которых заключается в определении оптимального вектора внутренних переменных состояния подсистемы при заданном векторе граничных переменных.

В случае, если PMU установлены только в некоторых граничных узлах, размерность решаемых задач верхнего уровня в иерархических алгоритмах ОС понижается. Вектор граничных переменных в этих системах уравнений включает в этом случае только переменные в граничных узлах, в которых не установлены PMU.

Иерархические алгоритмы распределенного ОС больших энергосистем. Задача ОС, решаемая на этапе п. 4) общей процедуры ОС для электроэнергетических систем, формулируется как задача оптимизации, в которой минимизируется сумма квадратов разностей между значениями некоторых переменных, соответствующими определяемым переменным состояния в системе, и значениями этих переменных, полученными в результате измерений. Определяемыми переменными состояния в этой задаче являются модуль и фазы напряжений в узлах ЭЭС.

Целевая функция, минимизируемая в данной задаче, имеет вид:

$$J(X) = [z - h(X)]^T W [z - h(X)], \quad (1)$$

где z – вектор измерений; $h(X)$ – вектор, представляющий измеряемые величины как функции переменных состояния; W – весовая диагональная матрица, обратная ковариациям ошибок измерений.

В качестве базового алгоритма, на основе которого разрабатывается иерархический алгоритм решения задачи оценивания состояния ЭЭС, был выбран алгоритм, реализующий применительно к этой задаче метод Ньютона второго порядка. Вектор приращений переменных состояния на каждой итерации вычисляется в данном алгоритме по следующему уравнению:

$$\Gamma \tilde{N}_X J(X) = \frac{\partial \tilde{N}_X J(X)}{\partial X} \Delta X, \quad (2)$$

где $\tilde{N}_X J(X)$ – градиент целевой функции $J(X)$; матрица в правой части уравнения является матрицей вторых производных (матрицей Якоби первых производных от $J(X)$); ΔX – вектор приращений переменных состояния.

Наиболее эффективно данный базовый алгоритм реализуется в виде алгоритма нормальных уравнений [2, 5], в котором решаемая на каждой итерации задача определения приращений переменных состояния имеет вид:

$$H^T W DZ(X) = [H^T W] \Delta X. \quad (3)$$

Здесь H – матрица частных производных от целевой функции $J(X)$ по определяемым переменным состояния; $DZ(X)$ – вектор разностей между значениями измерений и значениями этих величин как функций переменных состояния на данной итерации.

Алгоритм (3) является частной реализацией общего алгоритма (2).

Возможны два основных варианта построения распределенного иерархического алгоритма ОС, соответствующего сформулированным выше условиям [6].

В одном из них в модель системы, представляемой в соответствии с принципами ФМ как совокупность подсистем, граничные узлы вводятся как дополнительные по отношению к узлам, существующим в исходной модели, предшествующей выделению подсистем. Такие граничные узлы вводятся на линиях, связывающих примыкающие друг к другу подсистемы. При этом одна часть линии рассматривается как относящаяся к одной подсистеме, а вторая часть – к другой.

Во втором случае в качестве граничных узлов назначаются некоторые из узлов, присутствующих в исходной модели системы, соответствующей

формированию системы уравнений для рассматриваемой системы в целом.

В первом варианте системы уравнений в иерархической модели, предназначенной для решения этой задачи, базируются на функции Лагранжа, имеющей следующей вид:

$$L = \sum_I \dot{a} F_I + s^t (S_{bJ} + S_{bK}), \quad (4)$$

где S_{bJ} и S_{bK} – граничные мощности в узле b для подсистем J и K , примыкающих друг к другу в этом узле; I – индексы подсистем.

Данная функция включает целевые функции подсистем и дополнительные члены, позволяющие учесть ограничения в виде равенств на значения граничных переменных подсистем. Такие ограничения представляют условия, накладываемые законом Кирхгофа на значения потоков мощности, протекающих через граничные узлы. Вектор s^t в (4) является транспонированным вектором множителей Лагранжа, относящихся к этим ограничениям.

Очевидно, что введение дополнительных членов, учитывающих ограничения в виде равенств в (4), не изменяет получаемого решения, поскольку при любом решении эти члены равны нулю.

Из (4) следует, что решение задачи ОС в данной постановке заключается в вычислении векторов внутренних и граничных переменных подсистем и множителей Лагранжа s , при которых функция (4) принимает минимальное значение. Действия, выполняемые на каждой итерации в итерационных алгоритмах решения этой задачи, сводятся к определению приращений этих переменных.

Функция (4) для системы может быть представлена как сумма функций Лагранжа подсистем. Каждая из этих функций имеет следующий вид:

$$L_I = F_I + s^t S_{bI}. \quad (5)$$

Алгоритм ФМ для решения задачи ОС, базирующийся на сформулированных выше исходных положениях, включает следующие этапы.

1-й этап: задание нулевого приближения векторов переменных состояния (внутренних переменных) в подсистемах.

2-й этап: расчет значений переменных состояния в граничных узлах (граничных переменных), соответствующих значениям внутренних переменных, заданных на предыдущем шаге.

3-й этап: расчет вектор-градиента функции Лагранжа (4) по внутренним переменным каждой подсистемы.

4-й этап: расчет вектор-градиента функции Лагранжа (4) по граничным переменным каждой подсистемы.

5-й этап: проверка выполнения условий окончания итерационного процесса. Эти условия формулируются следующим образом:

$$\begin{aligned} \max \tilde{N}_{X_i} L_s \quad \varepsilon \quad \varepsilon \\ \max \tilde{N}_{X_b} L_s \quad \varepsilon \quad \varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

где X_i — внутренние переменные подсистем; X_b — граничные переменные; ε — параметр, определяющий точность расчета.

6-й этап: формирование для каждой подсистемы линейной системы уравнений, представляющей ее на данной итерации, и последующее определение ФХ подсистемы из данной системы уравнений.

Эта система уравнений записывается следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \tilde{N}_{X_i} L_I \\ \tilde{N}_{X_b} L_I \\ \tilde{N}_S L_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{ii} & w_{ib} & w_{is} \\ w_{bi} & w_{bb} & w_{bs} \\ w_{sb} & w_{sb} & w_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DX_i \\ DX_b \\ Ds \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Матрицы в правой части этого уравнения являются матрицами вторых производных от целевой функции по переменным, входящим в вектор правой части этого уравнения.

Определение ФХ подсистемы из данной линейной системы уравнений осуществляется с помощью последовательного исключения в ней приращений внутренних переменных. Два нижних вектора в левой части данной системы предварительно должны быть приняты равными нулю.

После исключения внутренних переменных система (7) принимает следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \tilde{N}_{X_i} L_I \\ \tilde{N}_{X_b} L_I \\ \tilde{N}_S L_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{\mathcal{F}} & w_{\mathcal{G}} & w_{\mathcal{H}} \\ 0 & w_{\mathcal{G}b} & w_{\mathcal{G}s} \\ 0 & w_{\mathcal{G}b} & w_{\mathcal{G}s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} DX_i \\ DX_b \\ Ds \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $w_{\mathcal{F}}$ — верхняя треугольная матрица.

Из (8) следует, что ФХ подсистемы представляется выражениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_s}{\partial X_b} \frac{\partial}{\partial J} = w_{\mathcal{G}b} DX_b + w_{\mathcal{G}s} Ds - \tilde{N}_{X_b} L_I; \\ \frac{\partial L_s}{\partial s} \frac{\partial}{\partial K} = w_{\mathcal{G}b} DX_b + w_{\mathcal{G}s} Ds - \tilde{N}_S L_I. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь L_s — функция Лагранжа для всей системы.

Векторы в левой части этого уравнения являются векторами приращений первых производных от целевой функции системы по граничным переменным и множителям Лагранжа s , вычисленным в

подсистеме I . Они представляют зависимость этих приращений от приращений граничных переменных и множителей Лагранжа s .

7-й этап: формирование и решение системы уравнений верхнего уровня, т.е. системы уравнений связи (СУС). Неизвестными переменными в этой системе уравнений являются приращения граничных переменных DX_b (модулей и фаз напряжений в граничных узлах) и множителей Лагранжа Ds .

Базисные уравнения для формирования СУС в этом алгоритме могут быть получены с помощью дифференцирования функции Лагранжа (4) по граничным переменным и множителям Лагранжа s .

Эти базисные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X_b} \frac{\partial L_s}{\partial J} + \frac{\partial}{\partial X_b} \frac{\partial L_s}{\partial K} = - \tilde{N}_{X_b} L_s; \\ \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial L_s}{\partial J} + \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial L_s}{\partial K} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Смысл этих уравнений заключается в следующем.

Приращения производных от функции Лагранжа по граничным переменным в прилегающих друг к другу в каждом граничном узле подсистемах J и K на каждой итерации должны быть такими, чтобы производная от этой функции по данной граничной переменной после выполнения данной итерации стала равной нулю. Для этого суммарные приращения этих первых производных на каждой итерации должны компенсировать значения этих производных в начале итерации.

Что касается приращений первых производных от функции Лагранжа по множителям s в прилегающих друг к другу подсистемах, то они должны быть на каждой итерации такими, чтобы ограничение в виде равенства, к которому относится соответствующий множитель Лагранжа, соблюдалось. Это может быть выполнено, если суммарное приращение этих первых производных на каждой итерации равняется нулю.

Подстановка для приращений производных в (10) выражений для них из правой части ФХ подсистем (9) позволяет получить следующую СУС:

$$A \begin{pmatrix} DX_b \\ Ds \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{N}_{X_b} L_s \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где A — квадратная матрица.

Вектор-градиент в правой части этого уравнения включает первые производные от L_s по граничным переменным. Они определяются по формуле

$$\tilde{N}_{X_b} L_s = (\tilde{N}_{X_b} L_s)_J + (\tilde{N}_{X_b} L_s)_K. \quad (12)$$

Решение системы уравнений (11) завершает этот этап алгоритма.

8-й этап: расчет приращений внутренних переменных состояния в подсистемах.

В векторах DX_b и Ds , вычисленных на предыдущем шаге, должны быть выделены подвекторы, относящиеся к граничным узлам каждой из подсистем. Для каждой из подсистем относящиеся к ней подвекторы должны быть подставлены в верхнюю часть системы (8), полученной в результате исключения по Гауссу приращений внутренних переменных на 6-м этапе.

Затем последовательная обратная подстановка в уравнения в верхней части (8) вычисляемых на каждом шаге приращений внутренних переменных, входящих в вектор DX_i , используется для вычисления приращений всех определяемых внутренних переменных каждой из подсистем.

9-й этап: расчет новых значений внутренних переменных состояния в подсистемах, выполняемый в соответствии с общим выражением:

$$X_i^{(k+1)} = X_i^{(k)} + DX_i^{(k)}. \quad (13)$$

После этого должны быть вычислены новые значения множителей Лагранжа s и новые значения граничных переменных X_b по общим выражениям:

$$\begin{aligned} s^{(k+1)} &= s^{(k)} + Ds^{(k)}; \\ q^{(k+1)} &= q^{(k)} + Dq^{(k)}; \\ U^{(k+1)} &= U^{(k)} + DU^{(k)}. \end{aligned} \quad (14)$$

10-й этап: возврат ко 2-му этапу.

Назначение граничных узлов как дополнительных по отношению к исходным узлам, существующим в первоначально задаваемой схеме сети, является необязательным, если в качестве граничных узлов могут быть заданы некоторые из узлов исходной схемы.

Это может быть сделано в случае, если измеряемыми величинами в окрестности исходных узлов, назначаемых в качестве граничных, являются только активные и реактивные мощности в линиях, примыкающих к этим узлам.

Это дает возможность значительно упростить иерархический алгоритм, предназначенный для решения задачи ОС, поскольку суммарная размерность решаемой задачи существенно понижается. Из числа рассчитываемых переменных в этом случае исключаются переменные, относящиеся к дополнительным узлам, рассматриваемым как граничные узлы, а также множители Лагранжа s .

Общая целевая функция для решаемой задачи ОС в иерархической модели системы принимает в этом случае следующий вид:

$$F_s = \sum_I \dot{a} F_I. \quad (15)$$

Таким образом, целевая функция системы равна в данном случае сумме целевых функций подсистем.

Алгоритм ФМ для решения задачи ОС в данной постановке состоит из тех же шагов, что и представленный выше алгоритм. Единственным отличием является то, что уравнение (7) необходимо заменить следующим приведенным ниже уравнением.

Исходная система уравнений, представляющая каждую из подсистем на 6-м этапе, принимает в этом случае следующий вид:

$$\begin{vmatrix} \tilde{N}_{X_i} F_I \\ \tilde{N}_{X_b} F_I \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} w_{ii} & w_{ib} \\ w_{bi} & w_{bb} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} DX_i \\ DX_b \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Формирование этой системы уравнений может быть наиболее эффективно выполнено в соответствии с алгоритмом, представленным уравнением (3).

Система уравнений, получаемая из системы уравнений (16) на 6-м этапе после исключения из нее приращений внутренних переменных:

$$\begin{vmatrix} \tilde{N}_{X_i} F_I \\ \tilde{N}_{X_b} F_I \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} w_{\mathcal{F}i} & w_{\mathcal{F}b} \\ 0 & w_{\mathcal{F}b} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} DX_i \\ DX_b \end{vmatrix}, \quad (17)$$

где $w_{\mathcal{F}}$ — верхняя треугольная матрица.

Из (17) следует, что ФХ подсистемы имеет в этом случае вид:

$$\frac{\partial F_s}{\partial X_b} \dot{\tilde{N}}_{X_b} = w_{\mathcal{F}b} DX_b - \tilde{N}_{X_b} F_I. \quad (18)$$

Формирование СУС, выполняемое на 7-м этапе, осуществляется в данной версии алгоритма ФМ следующим образом.

Исходным для формирования СУС является в этом случае уравнение:

$$\frac{\partial F_s}{\partial X_b} \dot{\tilde{N}}_{X_b} + \frac{\partial F_s}{\partial X_b} \dot{\tilde{N}}_{X_b} = - \tilde{N}_{X_b} F_s. \quad (19)$$

Формирование СУС выполняется при этом точно так, как в представленной ранее версии алгоритма. В результате образуется следующая система уравнений:

$$B DX_b = - \tilde{N}_{X_b} F_s, \quad (20)$$

где B — квадратная матрица; градиент в правой части системы вычисляется так же, как в уравнении (12).

Как и все алгоритмы, относящиеся к классу иерархических алгоритмов ФМ, приведенные алгоритмы характеризуются свойствами сходимости, идентичными соответствующим им базовым алгоритмам. (Алгоритм (15)–(20) иллюстрируется приведенным ниже численным примером.)

Наряду с представленными иерархическими алгоритмами ОС, основанными на принципах ФМ, к алгоритмам распределенного ОС относятся также алгоритмы декомпозиции, предусматривающие решение задач ОС в отдельных подсистемах. В данных алгоритмах решение задач ОС в каждой из подсистем выполняется во внутреннем итерационном цикле при некоторых фиксированных значениях граничных переменных. Выполнение условий оптимальности для граничных переменных и условий совместимости результатов расчета режимов в примыкающих друг к другу подсистемах обеспечивается в алгоритмах этого типа в дополнительном внешнем итерационном цикле.

Наличие дополнительного внешнего итерационного цикла приводит к тому, что эти алгоритмы не обеспечивают свойств сходимости, идентичных соответствующим базовым алгоритмам, относящимся к системе в целом. Данные алгоритмы представлены в [2, 4, 7–10].

Решение задач ОС на основе метода контрольных уравнений. Метод контрольных уравнений (КУ) разработан в ИСЭМ СО РАН [11]. Контрольные уравнения – это уравнения электрических цепей, в которые входят только измеренные переменные режима z :

$$w_k(z) = 0. \quad (21)$$

Они могут быть получены из системы уравнений установившегося режима (УУР) после исключения неизмеренных переменных. Впервые предложенные для достоверизации телеизмерений КУ затем стали применяться для решения практически всех перечисленных задач, входящих в комплекс ОС в реальном времени.

Фильтрация случайных ошибок с использованием КУ (задача ОС в узком смысле) решается в координатах z и сводится к минимизации критерия

$$J(z) = (\bar{z} - \hat{z})^T W (\bar{z} - \hat{z}) \quad (22)$$

при ограничениях в виде системы (21). Такой подход не требует перехода к вектору состояния X , позволяет учесть точные измерения, задавая им нулевые дисперсии. При этом соответствующее измерение не входит в (22), а фигурирует в (21) как константа.

При необходимости для расчета неизмеренных параметров выбирается базисная система измерений z_6 и решается система уравнений:

$$z_6(X) - \hat{z}_6 = 0. \quad (23)$$

Система (23) решается методом Гаусса, при этом на первой итерации одновременно выполняются треугольная факторизация матрицы и выбор базиса, а на всех последующих итерациях – только прямой ход Гаусса.

Метод КУ имеет ряд преимуществ по сравнению с постановкой (1):

1) задача ОС решается непосредственно в координатах вектора измеренных переменных z , что позволяет избежать искажения результатов ОС, вызванного эффектом размазывания ошибок;

2) алгоритмы ОС по КУ менее трудоемки и имеют высокое быстродействие, так как порядок системы КУ обычно существенно ниже порядка исходной системы УУР;

3) КУ позволяют обнаружить плохие данные перед выполнением процедуры ОС, при этом априори одновременно выявляются все идентифицируемые ошибочные измерения без повторения процедуры ОС, что делает предложенные алгоритмы быстродействующими.

Кроме того, в отличие от традиционных методов ОС, метод КУ позволяет фиксировать значения измеренных переменных, задавая им нулевые дисперсии. Это дает преимущества как при решении задачи ОС для полной схемы, так и при декомпозиции расчетной схемы, поскольку позволяет фиксировать значения граничных параметров режима. На основе метода КУ были разработаны эффективные алгоритмы декомпозиции задачи ОС [8, 9].

Обнаружение плохих данных при распределенном ОС. Современные исследования в области методов ОПД свидетельствуют о том, что эффективность практически всех методов ОПД возрастает при снижении размерности расчетной схемы [10, 11]. Таким образом, применение алгоритмов распределенного ОС наряду с другими преимуществами позволяет повысить эффективность методов ОПД.

Измерения параметров режима, используемые при решении задачи ОС, помимо случайных погрешностей, обусловленных погрешностями измерительного тракта, довольно часто содержат грубые ошибки, называемые часто по аналогии с английским термином «bad data» плохими данными. Грубые ошибки могут вызвать существенное искажение результатов ОС, поэтому одной из важных проблем при решении задачи ОС является проблема обнаружения ошибочных ТИ и подавления их влияния на результаты ОС. Для ее решения разработаны специальные методы, которые позво-

ляют обнаружить грубые ошибки до решения задачи ОС (априорные методы), в процессе ее решения (робастные критерии ОС) либо после ее решения (апостериорные методы) [11]. В алгоритмах реального времени чаще используются априорные методы ОПД, к которым относится метод КУ. Подстановка значений измерений в КУ приводит к появлению невязок, сравнивая которые с некоторым порогом d_i , определяемым статистическими свойствами нормальных ошибок измерений, т.е. проверяя условие

$$|w_{ki}(\bar{z}_i)| > d_i, \quad (24)$$

можно судить о наличии грубых ошибок среди компонент вектора измерений \bar{z}_i , входящих в i -е КУ.

Для определения ошибочных измерений по невязкам КУ разработаны алгоритмы логического анализа, основанные на предположении малой вероятности взаимной компенсации грубых ошибок в составе одного КУ. Опыт реализации алгоритмов в ПВК «Оценка» показал достаточно высокую эффективность предложенных подходов. Вместе с тем, здесь есть и свои проблемы, связанные, в основном, с низкой избыточностью ТИ, получаемых от системы SCADA, и сложной логикой программы при расчете схем большого размера. Кроме того, независимо от метода достоверизации ТИ при решении задачи ОС при низкой избыточности измерений, характерной для ЭЭС России, существует проблема *критических измерений* и *критических групп*, определение которых дано в [12]. В этих измерениях невозможно однозначно определить грубые ошибки.

Один из возможных подходов к решению этих проблем – использование технологий WAMS (Wide-Area Measurement Systems), создание которых стало возможно с появлением системы GPS (Global Positioning System) в 80-х годах прошлого века. Основным измерительным оборудованием систем WAMS, позволяющих контролировать состояние ЭЭС синхронно и с высокой точностью, являются устройства PMU [13]. По сравнению со стандартным набором телеизмерений, получаемым от системы SCADA, PMU, установленное в узле, может обеспечить точные (погрешность 0,2–0,5%) измерения модуля и фазы напряжения в этом узле, а также модулей и фаз токов в смежных с этим узлом ветвях.

Оптимальная расстановка PMU позволяет повысить избыточность ТИ SCADA и ликвидировать критические измерения и критические группы, т.е. добиться полного обнаружения грубых ошибок в измерениях. Развитие методов ОПД при совмест-

ном использовании данных SCADA и PMU представлено в [14].

Использование измерений от PMU в алгоритмах распределенного ОС. Установка PMU в граничных узлах позволяет зафиксировать граничные переменные вектора состояния U и q на измеренных с высокой точностью значениях. При выделении подсистем с граничными узлами и при возможности установки PMU во всех граничных узлах граничные условия выполняются автоматически, а решение координационной задачи состоит в расчете узловых инъекций в граничных узлах при использовании оценок перетоков мощности в линиях, полученных при расчете отдельных подсистем. При этом режимы отдельных подсистем могут рассчитываться независимо друг от друга, выполнения итерационных расчетов по подсистемам не требуется.

При выделении подсистем с граничными ветвями PMU устанавливается в одном из узлов граничной ветви, тогда на другом конце ветви может быть получено «расчетное» PMU, т.е. значения модуля и фазы напряжения, вычисленные через измерения установленного в смежном узле физического PMU. Как показали исследования, точность измерений «расчетного» PMU практически не уступает точности измерений реального PMU [15].

Установка PMU в одном из узлов граничной ветви в сочетании с измерениями от «расчетного» PMU в соседнем узле обеспечивают выполнение граничных условий в граничной связи. В этом случае режимы отдельных подсистем также могут рассчитываться независимо друг от друга, выполнения итерационных расчетов по подсистемам не требуется.

Для синхронизации (координации) фазовых углов напряжений, получаемых при решении задачи ОС по подсистемам, используются измерения фазовых углов от PMU, которые установлены по одному в каждой подсистеме. Эти узлы принимаются за базисные узлы подсистем. Измерения PMU координируют результаты ОС отдельных подсистем. При выделении подсистем с граничными узлами в качестве узлов для установки PMU целесообразно использовать общие граничные узлы для нескольких подсистем. Такая расстановка PMU одновременно с координацией фазовых углов напряжений по подсистемам упрощает решение координационной задачи.

При выделении подсистем с граничными ветвями в качестве базисного узла следует выбирать узел граничной ветви, в котором установлено реальное, а не «расчетное» PMU.

Обнаружение грубых ошибок (плохих данных) в телеинформации, или достоверизация ТИ, является

ся одной из наиболее важных задач при ОС ЭЭС. При расчете параллельно работающих подсистем, имеющих свои средства сбора и обработки телеинформации, из-за неточной синхронизации данных по подсистемам в граничных областях подсистем могут возникнуть взаимодействующие, а часто и согласованные плохие данные, что заметно усложняет процедуру их обработки и может повлиять на сходимость оценивания состояния.

Точно синхронизированные измерения от РМУ, установленных вблизи граничных узлов, позволяют существенно повысить эффективность обнаружения плохих данных в граничных областях и точность получаемых оценок.

Простым, но не оптимальным решением этой задачи является размещение РМУ во всех граничных узлах. На основе измерений установленного РМУ по формулам электрической цепи можно рассчитать модуль и фазу напряжения соседнего узла, т.е. получить так называемое «расчетное» РМУ. При оптимальном сочетании физических и расчетных РМУ во всех граничных узлах подсистем могут быть определены модули и фазы напряжения, необходимые для координации решений отдельных подсистем.

Для минимизации числа РМУ анализируется не только список граничных узлов, но и перечень внутренних линий подсистем, инцидентных этим узлам. Может оказаться, что граничные узлы, принадлежащие одной подсистеме, ограничивают одну и ту же линию. Тогда достаточно на одном конце линии установить РМУ, а на другом – получить «расчетное» РМУ. Для выбора оптимальной расстановки РМУ был разработан алгоритм, реализующий метод отжига [15].

Как показывают расчеты, число РМУ, устанавливаемых при декомпозиции схемы, существенно меньше общего числа граничных узлов.

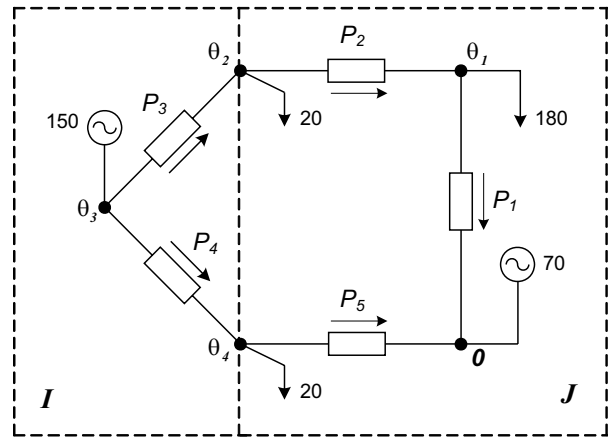
Пример расчета. Представленный выше иерархический алгоритм (15)–(20) иллюстрируется примером решения задачи ОС для системы, изображенной на рисунке. Задача ОС в этом примере состоит в расчете фазовых углов q во всех узлах данной системы.

Данная система представляется в этом примере как состоящая из двух подсистем I и J . В этой задаче принято, что характеристики ветвей сети, представляющие зависимость перетока мощности в ветви от разностей фаз напряжений в узлах примыкания, являются линейными.

Целевая функция, минимизируемая в задаче ОС в данном примере, имеет вид

$$F_s = [P_1 - 8,7q_1]^2 + [P_2 - 8,7(q_2 - q_1)]^2 + [P_3 - 8,7(q_3 - q_2)]^2 + [P_4 - 8,7(q_3 - q_4)]^2 + [P_5 - 8,7q_4]^2, \quad (\text{П-1})$$

где P_1-P_5 — измеренные значения активных мощностей (в МВт) в ветвях данной схемы: $P_1 = -105$, $P_2 = 80$,



Тестовая пятиузловая схема

$P_3 = 100$, $P_4 = 50$, $P_5 = 30$ (все весовые коэффициенты приняты равными 1).

Реактивные сопротивления всех ветвей схемы $x = 20$ Ом; напряжения в узлах схемы $U = 100$ кВ.

В случае, если для решения данной задачи ОС используется базовый алгоритм Ньютона, относящийся к системе в целом, решаемая система уравнений записывается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} -3220,11 \\ -348,12 \\ 2610,9 \\ -348,12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 302,96 & -151,48 & 0 & 0 \\ -151,48 & 302,96 & -151,48 & 0 \\ 0 & -151,48 & 302,96 & -151,48 \\ 0 & 0 & -151,48 & 302,96 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Dq_1 \\ Dq_2 \\ Dq_3 \\ Dq_4 \end{bmatrix} \quad (\text{П-2})$$

При решении данной задачи по алгоритму ФМ системы уравнений для подсистем I и J имеют в соответствии с (16) следующий вид:

$$\begin{bmatrix} -3220,11 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 302,96 & -151,48 & 0 \\ -151,48 & 151,48 & 0 \\ 0 & 0 & 151,48 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Dq_1 \\ Dq_{b_1} \\ Dq_{b_2} \end{bmatrix}; \quad (\text{П-3})$$

$$\begin{bmatrix} 2610,9 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 302,96 & -151,48 & -151,48 \\ -151,48 & 151,48 & 0 \\ -151,48 & 0 & 151,48 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Dq_2 \\ Dq_{b_1} \\ Dq_{b_2} \end{bmatrix}. \quad (\text{П-4})$$

После исключения из этих систем уравнений переменных, относящихся к внутренним узлам, в соответствии с (17) системы принимают вид:

$$\begin{bmatrix} -3220,11 \\ -1609,93 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 302,96 & -151,48 & 0 \\ 0 & 75,74 & 0 \\ 0 & 0 & 151,48 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Dq_1 \\ Dq_{b_1} \\ Dq_{b_2} \end{bmatrix}; \quad (\text{П-5})$$

$$\begin{bmatrix} 2610,9 \\ 1304,83 \\ 1304,83 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 302,96 & -151,48 & -151,48 \\ 0 & 75,74 & -75,74 \\ 0 & -75,74 & 75,74 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Dq_2 \\ Dq_{b_1} \\ Dq_{b_2} \end{bmatrix}. \quad (\text{П-6})$$

Соответствующие (18) ФХ подсистем находятся в нижней части этих систем уравнений:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_I}{\partial q_{b_1}} \\ \frac{\partial F_I}{\partial q_{b_2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 75,74 & 0 \\ 0 & 151,48 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Dq_{b_1} \\ Dq_{b_2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1609,93 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (\text{П-7})$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_J}{\partial q_{b_1}} \\ \frac{\partial F_J}{\partial q_{b_2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 75,74 & -75,74 \\ -75,74 & 75,74 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Dq_{b_1} \\ Dq_{b_2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1304,83 \\ -1304,83 \end{pmatrix}. \quad (\text{П-8})$$

Выражения из правых частей этих ФХ должны быть после этого подставлены в общее уравнение (19), для того чтобы получить левую часть СУС (20).

Кроме того, для определения составляющих вектор-градиента в правой части СУС (20) необходимо определить численные значения первых производных от F_s по граничным переменным. Они вычисляются по исходным данным (первым производным), рассчитанным в каждой из двух подсистем. Эти первые производные имеют в подсистемах I и J следующие численные значения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_I}{\partial q_{b_1}} &= -1392,48; & \frac{\partial F_J}{\partial q_{b_1}} &= 1740,6; \\ \frac{\partial F_I}{\partial q_{b_2}} &= -522,18; & \frac{\partial F_J}{\partial q_{b_2}} &= 870,3. \end{aligned}$$

Подстановка этих значений в (12) позволяет получить:

$$\frac{\partial F_s}{\partial q_{b_1}} = 348,1; \quad \frac{\partial F_s}{\partial q_{b_2}} = 348,1.$$

Сформированная таким образом СУС, соответствующая (20), имеет вид:

$$\begin{pmatrix} -348,12 \\ -348,12 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 151,48 & -75,74 \\ -75,74 & 227,22 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Dq_{b_1} \\ Dq_{b_2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 305,1 \\ -1304,83 \end{pmatrix}. \quad (\text{П-9})$$

Решение этой системы уравнений дает следующие значения граничных переменных: $q_{b_1} = -2,6493$; $q_{b_2} = 3,329$.

Подстановка этих значений в верхнее уравнение системы (П-6) в подсистеме I позволяет получить $q_2 = 8,975$. Такие же действия в верхнем уравнении системы (П-5) для подсистемы J дают значение $q_1 = -11,952$.

Вектор значений определяемых переменных, т.е. $[Dq_1 \ Dq_2 \ Dq_3 \ Dq_4]^T$, полученный из решения системы уравнений (П-2), относящейся к данной энергетической системе в целом, совпадает с приведенным выше вектором значений внутренних и граничных переменных, полученным по иерархическому алгоритму ФМ.

Полученные данные дают возможность вычислить значения оцененных параметров режима, соответствующих имеющемуся составу измерений и полученному вектору переменных состояния.

Для базового алгоритма они имеют численные значения:

$$\begin{aligned} P_1 &= 8,7q_1 = 8,7(-11,952) = -103,98; \\ P_2 &= 8,7 \times 8,7(q_2 - q_1) = 8,7(-2,6493 + 11,952) = 80,93; \\ P_3 &= 8,7(q_3 - q_2) = 8,7(8,975 + 2,6493) = 101,31; \\ P_4 &= 8,7(q_3 - q_4) = 8,7(8,975 - 3,329) = 49,1202; \\ P_5 &= 8,7q_4 = 8,7 \times 3,329 = 29,51. \end{aligned}$$

Для алгоритма ФМ они имеют численные значения.

В подсистеме J :

$$\begin{aligned} P_1 &= 8,7q_1 = 8,7(-11,952) = -103,98; \\ P_2 &= 8,7 \times 8,7(q_{b_1} - q_1) = 8,7(-2,6493 + 11,952) = 80,93; \\ P_5 &= 8,7q_{b_2} = 8,7 \times 3,329 = 29,51. \end{aligned}$$

В подсистеме I :

$$\begin{aligned} P_3 &= 8,7(q_2 - q_{b_1}) = 8,7(8,975 + 2,6493) = 101,31; \\ P_4 &= 8,7(q_2 - q_{b_2}) = 8,7(8,975 - 3,329) = 49,1202. \end{aligned}$$

Проиллюстрируем работу алгоритма ОПД методом КУ на данном примере.

Эталонные значения измерений перетоков активной мощности в линиях равны (в МВт): $P_1 = -100$, $P_2 = 80$, $P_3 = 100$, $P_4 = 50$, $P_5 = 30$. В данном примере имеется только одно избыточное измерение (пять измерений, четыре компоненты вектора состояния необходимо оценить), поэтому может быть составлено только одно КУ, в которое входят все измерения. По определению, данному в [12], эти измерения образуют критическую группу. В критической группе можно определить, являются ли все измерения достоверными – невязка КУ меньше порога, либо, в противном случае, среди измерений есть ошибочное, но определить, какое (какие) из них содержит грубую ошибку невозможно. Невозможно обнаружить ошибочное измерение и по остаткам оценивания, так как в критической группе остатки всех измерений равны между собой.

Было выполнено два расчета: I – по измерениям, приведенным выше (ошибка в 5 МВт моделировалась в измерении P_1), II – дополнительная ошибка в 30 МВт была внесена в измерение P_3 . Результаты расчетов показаны в табл. 1. Незначительные расхождения оценок I расчета с оценками, полученными методом ФМ, объясняются учетом нелинейности при моделировании зависимости $P(q)$ в этом расчете.

Таблица 1

Измерение	Эталон	Результаты ОС измеренных переменных при наличии в измерениях грубых ошибок		
		ТИ	Оценка	Остаток
I расчет				
P_1	-100	-105	-104,0	1,0
P_2	80	80	81,0	1,0
P_3	100	100	101,0	1,0
P_4	50	50	49,0	1,0
P_5	30	30	29,0	1,0
II расчет				
P_1	-100	-105	-110,0	5,0
P_2	80	80	75,0	5,0
P_3	100	130	125,0	5,0
P_4	50	50	55,0	5,0
P_5	30	30	35,0	5,0

В обоих случаях ни метод КУ, ни анализ остатков оценивания не позволяют идентифицировать плохие данные. В то же время, для ошибочных измерений оцен-

ки существенно отличаются от эталона, т.е. полученный в результате оценивания состояния режим не корректно отображает истинный режим ЭЭС.

После разделения схемы на две подсистемы было выполнено ОС для каждой подсистемы. В качестве базисного узла (БУ) был выбран общий для обеих подсистем узел 2. Фазовые углы после расчета с БУ 2 были скорректированы для приведения в соответствие с нулевым значением угла в БУ 5 полной схемы. Результаты расчетов компонент вектора состояния приведены в табл. 2.

Таблица 2

Угол	Эталон	Результаты оценивания компонент вектора состояния при расчете по подсистемам			
		Базисный узел			
		2		5	
		1-я пс	2-я пс	2-я пс	1-я пс
q_1	-11,537	-	-9,207	-12,192	-
q_2	-2,330	0	0	-2,915	-2,915
q_3	9,207	15,070	-	-	12,155
q_4	3,468	9,331	6,355	3,440	6,416
q_5	0	-	2,915	0	-

Из-за грубой ошибки в измерении P_3 оценки углов, полученные при расчете первой подсистемы (узлы 3 и 4) существенно отличаются от эталона. Оценки угла в граничном узле 4, полученные при расчете первой и второй подсистем, также различны ($q_4^I = 6,416^\circ$, $q_4^{II} = 3,440^\circ$). Приведение в соответствие этих углов потребует дополнительных итераций в методе ФМ.

При установке РМУ в граничных узлах 2 и 4 могут быть получены измерения фазовых углов напряжений, практически равные эталонным значениям (по данным [13] максимальная погрешность измерения угла составляет 0,1°). Эти измерения позволят при расчете по подсистемам получить совпадающие в пределах заданной точности значения углов в граничных узлах без выполнения итерационных расчетов. Установленное в узле РМУ позволяет получить также достаточно точные измерения токов по отходящим от узла ветвям (погрешность измерения находится в диапазоне 0,03–0,2%) в зависимости от фирмы-производителя РМУ и значения углов между током и напряжением. Это дает возможность вычислить псевдоизмерения (ПИ) перетоков активной мощности, точность которых, как показано в [15], не превышает 0,5%. Полученные ПИ могут использоваться для проверки достоверности ТИ перетоков SCADA.

В нашем примере по измерениям РМУ было вычислено значение ПИ перетока активной мощности в линии 3–2: $P_3^{ПИ} = 100$ МВт. Сравнивая значение ПИ со значением ТИ SCADA $\bar{P}_3 = 130$ МВт, можно сделать вывод о присутствии в ТИ SCADA грубой ошибки и заменить его на значение ПИ, которое затем использовать при решении задачи ОС. Результаты ОС по подсистемам с использованием измерений РМУ при их установке в граничных узлах представлены в табл. 3.

Таблица 3

Угол	Эталон	Результаты оценивания компонент вектора состояния (БУ 2)	
		1-я пс	2-я пс
q_1	-11,537	-	-11,537
q_2	-2,330	-2,330	-2,330
q_3	9,207	9,207	-
q_4	3,468	3,468	3,468
q_5	0	-	0,205

Как видно из табл. 3, без выполнения итерационных расчетов были получены результаты, практически совпадающие с эталонным режимом. Отличие оценки в узле 5 от эталонного значения обусловлено наличием погрешности в 5 МВт в измерении P_1 .

Выводы. 1. Разработанные алгоритмы распределенного ОС позволяют существенно повысить эффективность решения данного класса задач в больших электроэнергетических системах.

2. Использование измерений комплексных электрических величин (данных РМУ) в сочетании с ТИ SCADA позволяет существенно улучшить качество решения задачи ОС и открывает новые возможности при распределенном решении задач ОС:

назначение в качестве базисных узлов подсистем узлов с РМУ сокращает число итераций при использовании метода ФМ для иерархического ОС и тем самым сокращает общее время решения задачи;

измерения от РМУ, установленных в граничных узлах, позволяют существенно повысить эффективность обнаружения плохих данных и точность получаемых оценок;

установка РМУ даже в некоторых граничных узлах при использовании для ОС метода ФМ сокращает размерность системы уравнений связи, решаемой на верхнем уровне иерархии;

обеспечение всех граничных узлов физическими и расчетными РМУ позволяет полностью избежать итерационных расчетов при решении задачи ОС по подсистемам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суханов О.А., Шаров Ю.В. Иерархические модели в анализе и управлении режимами электроэнергетических систем. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
2. Shahidepour M., Wang Y. Communication and control in electric power systems. Application of parallel and distributed processing. — New York: John Wiley & Sons Inc., 2003.
3. Веников В.А., Суханов О.А. Кибернетические модели электрических систем. — М.: Энергоиздат, 1982.
4. Гамм А.З. Алгоритмы декомпозиции для решения проблемы оценивания состояния ЭЭС. — Электронное моделирование, 1983, № 3.
5. Wood A. J., Wollenberg B.F. Power generation, Operation and Control. — New York: Wiley Interscience, 1996.

6. Крошко Д.Л., Новицкий Д.А., Суханов О.А. Иерархические алгоритмы для решения задач оценивания состояния в электроэнергетических системах. — Электронное моделирование, 2007 (Киев).

7. Аюев Б.И., Демчук А.Т., Прихно В.Л. Иерархическая система расчета текущего режима Единой энергетической системы по данным телеизмерений. — Энергетик, 2004, №5.

8. Гамм А.З., Гришин Ю.А. Распределенная обработка информации в автоматизированных системах диспетчерского управления энергосистемами. — Труды V Международ. семинара «Распределенная обработка информации». — Новосибирск, 1995.

9. Колосок И.Н., Пальцев А.С. Двухуровневый иерархический алгоритм оценивания состояния ЭЭС и его реализация на основе мультиагентного подхода. — Сб. докладов III Международ. научно-практической конф. «ЭНЕРГОСИСТЕМА: управление, конкуренция, образование», т.1. — Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2008.

10. Falcao D.M., Wu and Murphy L. Parallel and distributed state estimation. — IEEE Trans. Power Syst., May 1995, vol.10, № 2.

11. Гамм А.З., Колосок И.Н. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах. — Новосибирск: Наука, 2000.

12. Глазунова А.М., Колосок И.Н. Достоверизация критических измерений и критических групп на основе контрольных уравнений при оценивании состояния ЭЭС. — Труды Всероссийской конф. «Энергетика России в XXI веке: развитие, функционирование, управление». — Иркутск, 2006.

13. Phadke A.G. Synchronized Phasor Measurements. A Historical Overview. — IEEE/PES Transmission and Distribution Conf., 2002, vol. 1.

14. Гамм А.З., Глазунова А.М., Гришин Ю.А. и др. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы. — Электричество, 2009, № 6.

15. Коркина Е.С. Развитие методов оценивания состояния ЭЭС на основе интеграции данных SCADA и PMU. — Автореф. дис.... канд. техн. наук. — Иркутск, 2009.

Авторы: Колосок Ирина Николаевна окончила электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1972 г. В 2004 г. защитила докторскую диссертацию в ИСЭМ СО РАН «Повышение достоверности телеизмерительной информации в ЭЭС на основе контрольных уравнений». Ведущий научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

Коркина Елена Сергеевна окончила электротехнический факультет Иркутского политехнического института в 1978 г. В 2009 г. защитила кандидатскую диссертацию в ИСЭМ СО РАН «Развитие методов оценивания состояния ЭЭС на основе интеграции данных SCADA и PMU». Научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

Суханов Олег Алексеевич окончил Ташкентский политехнический институт в 1961 г. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию «Метод функциональных характеристик (кибернетического моделирования) и его применение для решения электроэнергетических задач» в Научно-исследовательском институте электроэнергетики. Генеральный директор ООО «Распределенные технологии».