УДК 519.6888

Д. Л. Крошко, аспирант
Физико-технический центр НАН Украины
(Украина, 03142, Киев, б-р Вернадского, 36,
тел.: + 380(44) 4243025, факс: +380(44) 4248250,
E-mail: ftc@imp.kiev.ua; staregazer@ukr.net ICQ 275976670),
Д. А.Новицкий, канд. физ.-мат. наук, **О. А.Суханов**, д-р техн. наук
Ин-т энергетических систем
(Россия,125040, Москва, 1-я улица Ямского поля, 15,
тел.: +7 (495) 2577616, 2577619, 2577495; факс: +7 (095) 2577616, 2577619, 2577495,
E-mail: info@enersys.ru; www.enersys.ru)

Иерархические алгоритмы решения задач оценивания состояния электроэнергетических систем

Предложены алгоритмы решения задач оценки состояния электроэнергетических систем (расчета режима по данным измерений), основанные на выполнении действий с системами уравнений нижнего уровня (для подсистем) и верхнего (для граничных переменных). Эти алгоритмы наиболее эффективны при использовании их для проведения параллельных и распределенных вычислений в системах управления режимами больших электроэнергетических систем.

Запропоновано алгоритми розв’язування задач оцінювання стану електроенергетичних систем (розрахунку режиму за даними вимірювань), які базуються на виконанні дій з системами рівнянь нижнього рівня (для підсистем) та верхнього (для граничних змінних). Ці алгоритми найбільш ефективні при використанні їх для проведення паралельних та розподільних обчислювань у системах управління режимами великих електроенергетичних систем.

Ключевые слова: оценивание состояния, функциональное моделирование, иерархические алгоритмы, функциональная характеристика, система уравнений связи.

Задача оценивания состояния является одной из важнейших в общем комплексе задач управления режимами электроэнергетических систем (ЭЭС). Классический подход к решению этой задачи базируется на формировании и решении относящейся к рассматриваемой системе в целом системы уравнений, соответствующих минимуму целевой функции, которая имеет вид суммы квадратов разностей между оцениваемыми значениями переменных и их измеренными значениями.

Данная постановка задачи соответствует применяемой во всем мире технологии централизованных вычислений для расчета и оптимизации режимов ЭЭС. Она требует в общем случае большой ЭЭС, имеющей значительную пространственную протяженность, сбора всей информации о системе, являющейся объектом управления, в центр управления, последующего решения этой задачи на компьютере, находящемся в центре управления, и передачи результатов решения в локальные центры управления.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности систем управления режимами больших ЭЭС является использование в этих системах наряду с применяемой в настоящее время технологией централизованных вычислений технологии параллельных вычислений. В соответствии с этой технологией решение задач расчета и оптимизации режимов должен выполнять не один центральный компьютер, а множество параллельно работающих компьютеров, каждый из которых находится в одной из подсистем данной системы, и центральный компьютер системы (сервер).

Предлагаемые иерархические алгоритмы предназначены для решения задач оценивания состояния в системе распределенных вычислений, реализующей данную общую организацию. Такие алгоритмы могут быть построены методом функционального моделирования (ФМ), в основу которого положено представление ЭЭС в виде иерархической модели, т. е. в виде системы систем уравнений, относящихся к различным уровням иерархии модели. Основные принципы метода ФМ и его применение для решения задач расчета установившихся режимов и переходных процессов ЭЭС описаны в [1, 2]. Согласно [1—3] сформулируем эти принципы.

1. Представление подсистем в виде функциональных характеристик (ФХ), отражающих зависимости между векторами граничных переменных различного типа. Эти характеристики выполняют условие соблюдения в подсистемах всех внутренних ограничений в виде равенств и неравенств.

2. Построение и функционирование модели как иерархической структуры, включающей модели нижнего уровня, т. е. системы уравнений подсистем, и модель верхнего уровня, т. е. систему уравнений, включающую только граничные переменные подсистем.

3. Определение значений граничных переменных подсистем на верхнем уровне модели с помощью формирования и решения систем уравнений связи (СУС), в которых подсистемы представлены своими ФХ, и уравнения формируются с учетом условий, накладываемых на значения граничных переменных, когда они вычислены в различных примыкающих одна к другой подсистемах.

На основе этих принципов разработаны иерархические алгоритмы для решения задач расчета установившихся режимов и переходных процессов, а также для оптимизации режимов больших ЭЭС [1—5]. Важнейшим свойством этих алгоритмов является идентичность результатов, полученных при их использовании, с результатами применения соответствующих базовых алгоритмов, позволяющих получить решение системы уравнений, описывающей систему в целом. Это относится и к конечным результатам итерационного процесса решения, и к промежуточным, получаемым на отдельных итерациях.

Таким образом, иерархические алгоритмы ФМ дают возможность использовать при решении основных задач моделирования и управления режимами ЭЭС все преимущества параллельной и распределенной организации вычислений с гарантией отсутствия искажений в результатах получаемого решения и без возникновения дополнительных проблем, связанных со сходимостью итерационного процесса, позволяющего получить это решение.

Основными элементами в структуре иерархических алгоритмов ФМ, являются формирование и решение системы уравнений верхнего уровня, т. е. СУС, включающей в качестве вектора неизвестных (определяемых) переменных вектор граничных переменных (или их приращений на данной итерации). Данная система уравнений формируется из выражений, представляющих ФХ подсистем, которые входят в рассматриваемую систему. Каждая из ФХ представляет собой зависимость между векторами первых и вторых граничных переменных соответствующей подсистемы.

В качестве первых граничных переменных в иерархических алгоритмах расчета установившихся режимов (УР), описанных в [3, 4], рассматриваются модули и фазы напряжений в граничных узлах (находящихся на границах между подсистемами, которые проходят по серединам ветвей, соединяющих подсистемы). Эти переменные входят в СУС в качестве векторов определяемых переменных. Если в качестве определяемых переменных в СУС приняты первые граничные переменные, то в соответствии с принципами ФМ формирование СУС должно выполняться на основе записанных в общем виде уравнений, определяющих условия совместимости результатов расчета режима в примыкающих одна к другой подсистемах.

Для граничного узла i, расположенного между подсистемами I и J, эти уравнения могут быть записаны в виде

$$\Delta P_{iI} + \Delta P_{iJ} = 0, \ \Delta Q_{iI} + \Delta Q_{iJ} = 0, \ i = 1, n, \tag{1}$$

где ΔP_{iI} и ΔQ_{iI} — приращения значений активной и реактивной мощностей, поступающих в подсистему I через граничный узел i; ΔP_{iJ} и ΔQ_{iJ} — приращения значений активной и реактивной мощностей, поступающих в подсистему J через граничный узел i.

Уравнения, входящие в СУС, получают с помощью подстановки в уравнения (1) выражений для P_{iI}, P_{iJ}, Q_{iI}, Q_{iJ} из правых частей ФХ подсистем I и J. Данные ФХ имеют следующий вид:

$$\Delta S = A\Delta U + \Delta S_0, \qquad (2)$$

где $\Delta S = I\Delta P \Delta Q I$, $\Delta U = I\Delta\,\theta\,\Delta U I$. Векторы ΔS и ΔU в (2) рассматриваются как векторы неизвестных переменных. Элементы матрицы A и вектора ΔS имеют численные значения.

Если алгоритм ФМ формируется на основе базового алгоритма Ньютона, то ФХ каждой из подсистем, входящих в модель системы, образуется в результате исключения по Гауссу приращений внутренних переменных из системы уравнений подсистемы, включающей приращения как внутренних, так и граничных переменных [1]. В результате подстановки в (1) соответствующих строк из (2) для граничного узла i получим следующие уравнения:

$$\sum_j a_{ij}^I \Delta\theta_j^I + \sum_j b_{ij}^I \Delta U_j^I + \sum_j a_{ij}^J \Delta\theta_j^J + \sum_j b_{ij}^J \Delta U_j = -\Delta P_0^I - \Delta P_0^J;$$

$$\sum_j c_{ij}^I \Delta\theta_j^I + \sum_j d_{ij}^I \Delta U_j^I + \sum_j c_{ij}^J \Delta\theta_j^J + \sum_j d_{ij}^J \Delta U_j^J = -\Delta Q_0^I - \Delta Q_0^J, \qquad (3)$$

где a, b, c, d — элементы матрицы частных производных; U и q — модуль и фаза напряжений в узлах.

Совокупность уравнений (3), относящихся ко всем граничным узлам в модели системы, позволяет получить систему уравнений верхнего уровня, т. е. СУС ,

$$B\Delta U_{г} = \Delta S_0\,, \qquad (4)$$

в результате решения которой можно определить значения приращений всех граничных переменных, входящих в вектор $\Delta U_{г}$, т. е. приращений модулей и фаз напряжений в граничных узлах.

На следующем этапе алгоритма ФМ вычисляют значения приращений всех внутренних переменных подсистем. Для этого необходимо относящиеся к каждой подсистеме подвекторы полученного на предыдущем этапе вектора ΔU подставить в системы уравнений соответствующих подсистем и затем выполнить обратный ход по Гауссу в верхних уравнениях этих систем.

Полученные в результате данной последовательности действий, выполняемых с системами уравнений верхнего и нижнего уровня, значения приращений внутренних переменных каждой подсистемы (т. е. модулей и фаз напряжений внутренних узлов) совпадают со значениями, полученными в результате решения относящейся к системе в целом системы уравнений, составленной в соответствии с методом Ньютона на данной итерации [1]. Такое совпадение является результатом того, что при формировании системы уравнений верхнего уровня выполняются как ограничения в виде равенств, накладываемые на приращения внутренних переменных каждой подсистемы, так и условия совместимости результатов расчетов, выполняемых в примыкающих одна к другой подсистемах, вытекающие из закона Кирхгофа (см. (1)).

Свойства эффективности алгоритмов ФМ при решении задач расчета УР определяются, с одной стороны, гарантией качества получаемых результатов и идентичностью свойств сходимости этих алгоритмов и соответствующих им базовых алгоритмов (что является следствием указанного выше совпадения) и, с другой стороны, минимальным объемом вычислений, выполняемых при расчете ФХ подсистем и расчете приращений внутренних переменных подсистем после подстановки значений граничных переменных. В частности, выполняемые при расчете ФХ действия сводятся к процедуре прямого хода по Гауссу по строкам, соответствующим внутренним переменным в системах уравнений подсистем, а действия, выполняемые при расчете приращений внутренних переменных, — к процедуре обратного хода по Гауссу в этих строках.

Указанные выше свойства алгоритмов ФМ подтверждены результатами расчетов, проведенных по разработанным за последние 20 лет в нашей стране и за рубежом (в Польше и Болгарии) программам, реализующим эти алгоритмы. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при параллельной реализации алгоритмов суммарное время решения задачи расчета УР значительно сокращается по сравнению с временем расчета для последовательных алгоритмов (примерно в N раз для больших схем, где N — число подсистем).

Для создания алгоритмов оценивания состояния, базирующихся на тех же принципах, что и рассмотренный выше алгоритм ФМ, и обладающих такими же свойствами эффективности, при формировании систем уравнений подсистем уравнения, относящиеся к внутренним узлам подсистем, следует составлять исходя из условия компенсации (т.е. приведения к нулю) на данной итерации значений первых производных от целевой функции подсистемы по независимым переменным, соответствующим каждому внутреннему узлу. Если в качестве базового для построения иерархического алгоритма ФМ принять алгоритм Ньютона второго порядка, с помощью которого решается задача минимизации целевой функции F оценки состояния для системы в целом, то в системе уравнений подсистемы уравнение для компенсации производной одной из независимых переменных будет иметь вид

$$-\frac{\partial F_I}{\partial x_k}=\sum_i \frac{\partial^2 F_I}{\partial x_k \partial x_i}\Delta x_i+\sum_b \frac{\partial^2 F_I}{\partial x_k \partial x_b}\Delta x_b, \tag{5}$$

где F_I — значение целевой функции, минимизируемой в подсистеме при решении задачи оценивания состояния.

В уравнении (5) в качестве независимых внутренних переменных x_i рассматриваются модули и фазы (U и θ) напряжений внутренних узлов подсистемы (если напряжения внутренних узлов представлены в полярных координатах) или составляющие этих напряжений по продольной и поперечной оси (U и V), если они представлены в прямоугольных координатах. Левая часть уравнения (5) — взятое с обратным знаком численное значение производной целевой функции по одной из внутренних переменных. В качестве граничных переменных x_b в уравнении (5) рассматриваются такие же как для внутренних узлов составляющие напряжений граничных узлов.

Уравнения типа (5) должны быть составлены для каждой из внутренних переменных подсистемы. Общее число этих уравнений равно удвоенному числу внутренних узлов подсистемы.

Для получения полной системы уравнений подсистемы совокупность уравнений (5) следует дополнить уравнениями, представляющими зависимости приращений мощностей в граничных узлах подсистемы от приращений напряжений во внутренних и граничных узлах. Эти уравнения, записанные для одного граничного узла, имеют вид

$$\Delta P_k = \sum_i \frac{\partial P_k}{\partial x_i}\Delta x_i + \sum_b \frac{\partial P_k}{\partial x_b}\Delta x_b;$$
$$\Delta Q_k = \sum_i \frac{\partial Q_k}{\partial x_i}\Delta x_i + \sum_b \frac{\partial Q_k}{\partial x_b}\Delta x_b. \tag{6}$$

Общее число таких уравнений для подсистемы равно удвоенному числу граничных узлов.

Записанные совместно все уравнения типа (5) и (6) образуют полную систему уравнений подсистемы, имеющую порядок, равный удвоенному суммарному числу узлов в модели системы (включая внутренние и граничные узлы). В общем виде данную систему можно представить следующим образом:

$$\begin{vmatrix} -\dfrac{\partial F}{\partial X_{\text{в}}} \\ \Delta S_{\text{г}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dfrac{\partial^2 F}{\partial X_{\text{в}}^2} & \dfrac{\partial^2 F}{\partial X_{\text{в}} \partial X_{\text{г}}} \\ \dfrac{\partial S_{\text{г}}}{\partial X_{\text{в}}} & \dfrac{\partial S_{\text{г}}}{\partial X_{\text{г}}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta X_{\text{в}} \\ \Delta X_{\text{г}} \end{vmatrix}, \tag{7}$$

где $\dfrac{\partial F}{\partial X_{\text{в}}}$ — вектор первых производных целевой функции подсистемы по внутренним переменным; $\dfrac{\partial^2 F}{\partial X_{\text{в}}^2}$ и $\dfrac{\partial^2 F}{\partial X_{\text{в}} \partial X_{\text{г}}}$ — матрицы вторых производных этой целевой функции; $\dfrac{\partial S_{\text{г}}}{\partial X_{\text{в}}}$ и $\dfrac{\partial S_{\text{г}}}{\partial X_{\text{г}}}$ — матрицы первых производных от мощностей в граничных узлах подсистемы по внутренним и граничным переменным; $\Delta S_{\text{г}}$ — вектор приращений активных и реактивных мощностей, поступающих в подсистему через граничные узлы; $\Delta X_{\text{в}}$ и $\Delta X_{\text{г}}$ — векторы приращений внутренних и граничных узлов подсистемы.

Первым шагом, выполняемым при решении задачи по данному алгоритму, является формирование систем уравнений подсистем при заданном нулевом приближении для значений внутренних и граничных переменных каждой подсистемы. Для этого необходимо вычислить первые производные, образующие вектор в левой части этого уравнения, а также матрицы первых и вторых производных в правой части уравнения. Численное значение вектора $\Delta S_{\text{г}}$ принимается равным нулю.

На втором шаге в верхних строках системы (7) выполняется прямой ход по Гауссу, т. е. последовательное исключение переменных $\Delta X_{\text{в}}$ из этой системы. В результате применения данной процедуры ко всем строкам системы вплоть до строк, включающих $\Delta S_{\text{г}}$, система будет приведена к виду

$$\begin{vmatrix} \dfrac{\partial F_I}{\partial X_{\text{в}}} \\ \Delta S_{\text{г}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} B_{\text{в.в}} & B_{\text{в.г}} \\ 0 & B_{\text{г.г}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta X_{\text{в}} \\ \Delta X_{\text{г}} \end{vmatrix}, \tag{8}$$

где $B_{\text{в.в}}$ — верхняя треугольная матрица.

После получения (8) можно предположить, что ФХ подсистемы примет вид $\Delta S = B_{\text{г.г}} X_{\text{г.г}} + \Delta S_0$, где $\Delta S_0 = -\Delta S_{\text{г}}$. Если в качестве независимых переменных при решении задачи оценки состояния приняты продольные и поперечные составляющие комплексных напряжений, то представляя обобщенные переменные как переменные, имеющие физический смысл, ФХ подсистемы можно записать в виде

$$\begin{vmatrix} \Delta P_b \\ \Delta Q_b \end{vmatrix} = B_{\text{г.г}} \begin{vmatrix} \Delta U \\ \Delta V \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta P_0 \\ \Delta Q_0 \end{vmatrix}. \tag{9}$$

После расчета ФХ всех подсистем следующим шагом в общей структуре алгоритма ФМ является формирование СУС. В рассматриваемом алгоритме оценки состояния этот шаг выполняется так же, как в алгоритме расчета УР на основе сформулированного выше общего принципа подстановки выражений для ФХ в уравнения, отображающие условия совместимости результатов расчета режимов в примыкающих одна к другой подсистемах (см. (1) —(4)).

Таким образом, для решения задачи верхнего уровня необходимо сформировать следующую СУС:

$$B\Delta X_{\text{г}} = \Delta S_0, \tag{10}$$

в которой вектор приращений определяемых граничных переменных может включать приращения модулей и фаз или продольных и поперечных составляющих напряжений (в зависимости от принятого представления) во всех граничных узлах подсистем.

В результате решения системы (10) должны быть вычислены приращения граничных переменных на данной итерации. Это дает возможность вычислить на следующем шаге приращения внутренних переменных для всех подсистем. Так же как при решении задачи расчета установившегося режима по алгоритму ФМ, для определения приращений внутренних переменных в данном алгоритме необходимо выполнять процедуру обратного хода по Гауссу в верхних уравнениях преобразованной системы (8) с подстановкой в эти уравнения соответствующего данной подсистеме подвектора вычисленного на предыдущем этапе вектора ΔX. В результате выполнения указанной последовательности действий на каждой итерации вычисляются все приращения независимых переменных (которые являются в данной модели внутренними переменными подсистем).

Для перехода к следующей итерации необходимо вычислить новые значения внутренних переменных в соответствии с общей формулой $X^{k+1} = X^k + \Delta X^k$, где k — индекс итерации, и рассчитать составляющие напряжений в граничных узлах, исходя из того, что эти узлы находятся в серединах ветвей, соединяющих внутренние узлы примыкающих одна к другой подсистем.

Итерационный процесс в системе в целом прекращается при условии, что модули всех численных значений производных от целевых функций подсистем по независимым переменным не превышают заданной малой величины ε.

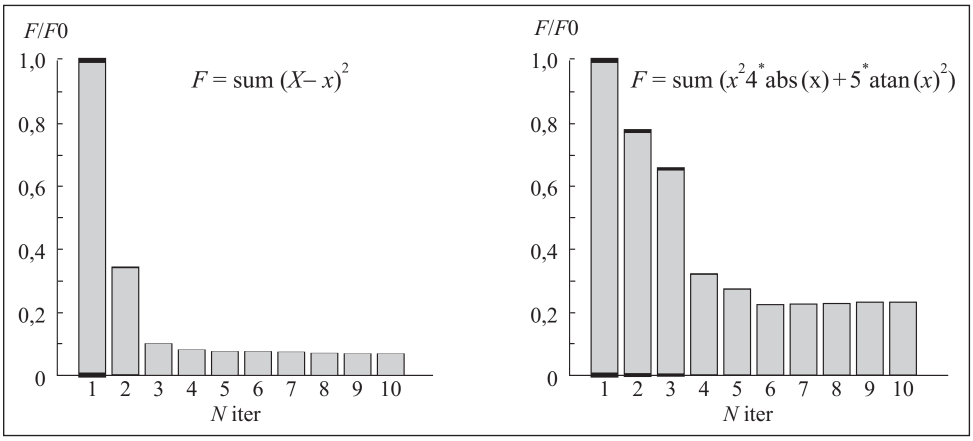
Анализ предлагаемого обобщенного алгоритма оценки состояния, основанного на принципах ФМ, показывает, что при его применении, как и при использовании базового алгоритма Ньютона второго порядка, на каждой итерации обеспечивается выполнение условий достижения нулевого значения производной целевой функции по каждой из независимых переменных оптимизации (в принятой на данной итерации линейной идеализации). Это условие выполняется на всех шагах данного алгоритма, т. е. при расчете ФХ, и, следовательно, при формировании и решении СУС, и далее, во время расчета приращений внутренних переменных при выполнении процедуры обратного хода по Гауссу в системах уравнений подсистем. Кроме того, в данном алгоритме выполняются также условия совместимости результатов расчетов, проводимых в примыкающих одна к другой подсистемах, поскольку формирование СУС (10) осуществляется на основе уравнений (1), представляющих законы Кирхгофа для мощностей, протекающих через граничные узлы.

Таким образом, при решении поставленной задачи обеспечивается идентичность результатов расчета приращений определяемых переменных, получаемых на каждой итерации по базовому алгоритму Ньютона второго порядка и соответствующему ему иерархическому алгоритму ФМ. В целом разработанный алгоритм реализует применительно к решению задач оценки состояния основные принципы метода ФМ и возникающие при этом возможности и свойства эффективности.

На основе описанной общей организации алгоритма могут быть сформированы иерархические алгоритмы на основе различных модификаций базового алгоритма Ньютона второго порядка, а также алгоритмы с использованием различных вычислительных процедур в различных подсистемах.

Описанный выше основной алгоритм имеет ряд значительных преимуществ по сравнению с известными до настоящего времени алгоритмами оценки состояния, ориентированными на распределенную технологию вычислений [6, 7]. В частности, в описанных в [6, 7] алгоритмах выполнение условий совместимости результатов расчетов режимов, выполняемых в различных подсистемах, осуществляется с помощью дополнительного итерационного процесса, предусматривающего введение виртуальных измерений в граничных узлах и использование при расчете граничных переменных подбираемых экспериментально коэффициентов. Это значительно усложняет общую организацию итерационного процесса решения задачи оценки состояния и ухудшает его надежность и сходимость. В отличие от алгоритмов этого типа, в предлагаемом иерархическом алгоритме обеспечивается идентичность его сходимости при решении этих задач со сходимостью соответствующего ему базового алгоритма (т. е. алгоритма Ньютона второго порядка).

По сравнению с рассматриваемыми в [7] алгоритмами декомпозиции, основанными на операциях с блоками (подматрицами) блочно-диагональной матрицы, включающими (в линейной части) многочисленные операции обращения, перемножения и сложения значительных по размерам подматриц, относящихся к подсистемам большой ЭЭС, алгоритм ФМ для решения задачи оценки состояния предусматривает на нижнем уровне только выполнение операций, аналогичных операциям исключения по Гауссу с исходными (слабозаполненными) матрицами подсистем, при получении ФХ подсистем и операций обратного хода по Гауссу при



расчете приращений внутренних переменных. На верхнем уровне модели выполняется только решение СУС, имеющей очень малую размерность.

Представленный основной алгоритм реализован в виде программы, с помощью которой решен ряд задач оценивания состояния для тестовых схем ЭЭС, включающих от 2 до 118 узлов (генерации и потребления). При формировании иерархической модели в этих схемах были выделены две подсистемы. Число граничных узлов, соединяющих две подсистемы, составляло от 1 до 5. Расчет каждого из режимов, соответствующих задаваемым данным измерений в этих схемах, проводился по иерархическому алгоритму и соответствующему ему базовому алгоритму Ньютона второго порядка.

Результаты расчетов подтвердили сформулированные выше теоретические положения, определяющие основные свойства этого алгоритма.

Приведем основные сведения по программной реализации различных иерархических алгоритмов и соответствующих базовых алгоритмов. Все программные реализации были выполнены в среде MATLAB7.x. В качестве независимых переменных при решении задач оценки состояния во всех вариантах приняты прямоугольные составляющие U и V (продольные и поперечные составляющие напряжений)

Матрицы первых и вторых производных целевой функции, а также производных по P и Q рассчитывались аналитически при слабой заполненности матриц проводимостей. Использование точных, а не приближенных результатов вычисления матриц (например, в некоторых других программных продуктах часто пренебрегают первым и третьим квадрантом матрицы Гессе) позволяет расширить диапазон сходимости и улучшить сходимость по каждой единичной итерации (что, однако, приводит к незначительному увеличению вычислений на единичной итерации).

В настоящее время реализованы алгоритм Ньютона с регулировкой шага (и без нее), который используется в базовой и распределенной модификации, а также базовый алгоритм на основе fminunc-функции из Optimization Toolbox системы MATLAB. В ряде случаев при реализации распределенного алгоритма была отмечена более быстрая сходимость, обусловленная большим числом степеней свободы регулировочного коэффициента (число подсистем N) по сравнению с базовым алгоритмом (с одной подсистемой). Во всех проведенных расчетах получено совпадение конечных результатов решения задачи с использованием иерархического и соответствующего базового алгоритма при одинаковой их сходимости.

Для схемы из 118 узлов и пяти граничных получено решение задачи оценки состояния по иерархическому алгоритму. На рисунке приведены диаграммы численных значений целевой функции на последовательных N итерациях процесса решения для случаев минимизации целевой функции $F=\sum_i f(x_i)$. Задача для $f(x)=x^2$ решалась методом Ньютона второго порядка, а для $f(x)=x^2+4|x|+5a\tan(x)^2$ — методом Trust-Region Quazi-Newton, реализованным в стандартных функциях MATLAB.

Выводы. Таким образом, принципы и общая иерархическая структура алгоритмов ФМ могут быть использованы для решения задачи оценивания состояния большой ЭЭС. Применение разработанного иерархического алгоритма оценки состояния, основанного на алгоритме Ньютона второго порядка, является наиболее эффективным в распределенных системах управления режимами ЭЭС.

Наиболее важные преимущества данного алгоритма и других алгоритмов этого типа следующие:

эффективная организация вычислительного процесса и процессов подготовки и передачи информации при решении этого класса задач;

идентичность получаемых результатов и свойств сходимости в иерархическом и базовом алгоритмах;

отсутствие необходимости передачи информации о внутреннем режиме и параметрах подсистем в центральный компьютер, что имеет особое значение для расчетов режимов больших ЭЭС, включающих ЭЭС других стран, и для решения задач объединений рынков электроэнергии [5] ;

возможность расчета режимов отдельных подсистем при учете режимов других подсистем, но без расчета их внутреннего режима, благодаря использованию ФХ «закрытых подсистем» [3].

Algorithms for solving the problems of electric power system state estimation (calculation of regime by the data of measurements) are proposed. They are based on operations with the equation sets of low level (for subsystems) and of high level (for boundary variables).These algorithms are especially efficient for parallel and distributed computations in the control systems of the great electric power system regimes.

1. *Веников В. А., Суханов О. А*. Кибернетические модели электрических систем. — М.: Энергоиздат, 1982. — 328 с.
2. *Суханов О. А., Тимофеев В. А., Чандра Ш. С.* Применение принципов функционального (кибернетического) моделирования для решения задач управления и проектирования электроэнергетических систем//Электричество. — 1997. — № 4. — С. 2—6.
3. *Soukhanov O. A., Shil S. C.* Application of functional modelling to the solution of electrical power systems optimization problems//Intern. J. of Electrical Power & Energy Systems. — 2000. — № 2. — P. 119—127.
4. *Королев М. Л., Суханов О. А.* Алгоритмы функционального моделирования для оптимизации режимов электроэнергетических систем //Сб. докл. II Всероссийской науч.-техн. конференции. ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. — № 12 (42). —С. 150—154.
5. *Ковалев В. Д., Макеечев В. А., Суханов О. А., Шаров Ю. В.* Распределенная система управления режимами электроэнергетических систем//Сб. докл. Международной конференции «Электротехника, энергетика, экология — 2004». — СПб: 2004. — С. 38—41.
6. *Reza Ibrahimian and Ross Baldick.* State Estimation Distributed Processing//IEEE Transactions on Power Systems. — 2000. — Vol. 15, No. 4. — P. 1240—1246.
7. *Mohammad Shahidehpour, Yaoyu Wang.* Communication and Control in Electric Power Systems. — Wiley: Interscience, 2003.— 534 p.
8. *М.В.Хохлов.* Методы устойчивого оценивания состояния ЭЭС в оперативных задачах надежности. http://energy.komisc.ru/seminar/Hohl-tuap.pdf
9. *Jabr R. A., Pal B. C* Iteratively re-weighted least absolute method for state estimation//IEEE Proc. — 2003. — Vol. 150, № 4.

Поступила 26.10.05;
после доработки 01.02.06

КРОШКО Дмитрий Леонидович, аспирант Физико-технического центра НАН Украины. В 2003 г. окончил Киевское отделение Московского физико-технического ин-та. Область научных исследований — математическое моделирование.

НОВИЦКИЙ Дмитрий Александрович, канд. физ.-мат. наук, ген. директор ЗАО «Ин-т энергетических систем». В 1995 г. окончил Московский физико-технический ин-т. Область научных исследований — методы моделирования, анализа и управления режимами электроэнергетических систем.

СУХАНОВ Олег Алексеевич, д-р техн. наук, науч. консультант ЗАО «Ин-т энергетических систем». В 1961 г. окончил Ташкентский политехнический ин-т. Область научных исследований — методы моделирования, анализа и управления режимами электроэнергетических систем.