© П.И. Бартоломей, С.И. Семененко

(cc) BY

УДК 621.311.001.57

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ СВИ И ИЗМЕРЕНИЙ SCADA В ЭЭС

П.И. Бартоломей, С.И. Семененко

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
sinissem@gmail.com

Резюме: *В современных энергосистемах последние 20 лет активно внедряются системы измерений, в которых добавлена высокоточная синхронизированная метка времени, позволяющая получать помимо действующего значения тока линии и напряжения шины их электрические фазные углы. За предыдущие годы сформировалось большое количество методов получения установившего режима на базе телеметрии (оценивания состояния), которые основаны на учете измерений только модулей этих величин, а также значений активной и реактивной составляющих мощностей инъекций в узлах и перетоков в ветвях. Большая часть этих методов основывалась на методе взвешенных наименьших квадратов или других методах, основанных на методе максимального правдоподобия, для которых требуется определение весовых коэффициентов измерений, традиционно выбираемых на основе относительных погрешностей этих измерений. Однако имеется проблема учета измерений электрических углов, для которых относительная погрешность оказывается принципиально неопределимой. Также существует проблема, связанная с объединением измерений СВИ с традиционными средствами измерений в единую измерительную систему, ввиду существенного различия в точности и частоте обновления. В работе предложен подход для объединения средств СВИ с традиционными средствами измерения SCADA в рамках процедуры оценивания состояния, учитывающий изложенные проблемы.*

Ключевые слова: *статическое оценивание состояния, синхронизированные векторные измерения (СВИ), метод максимального правдоподобия, выбор весовых коэффициентов, линейное оценивание состояния.*

STATE ESTIMATION METHOD DEVELOPMENT FOR SCADA AND SYNCHRONIZED PHASOR MEASUREMENTS WITHIN POWER SYSTEM

P.I. Bartolomey, S.I. Semenenko

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia
sinissem@gmail.com

Abstract: *In modern power systems, the special kind of measurement systems was actively implemented for the last 20 years. These measurement systems have a high-precision synchronized time stamp, which makes it possible to obtain, in addition to the effective value of line current and bus voltage, the electrical phase angles. In previous years, a large number of methods for obtaining a steady state based on telemetry (state estimation) have been formed, which are based on taking measurements of only the modules of these quantities, as well as the*

values of the active and reactive components of injection power in the nodes and flows in the branches. Most of these methods were based on the weighted least squares method, or other methods based on the maximum likelihood method, for which determination of the weighting factors of measurements, traditionally chosen on the basis of relative errors of these measurements, is required. However, there is the problem of taking measurements of electrical angles, for which the relative error is fundamentally indeterminable. There is also a problem associated with the integration of measurements of phasor measurements with traditional measurement tools into a single measuring system due to a significant difference in accuracy and update frequency. The paper proposes an approach for combining phasor measurements with traditional SCADA measurements in the framework of the state estimation procedure, taking into account the problems described.

Keywords: *static state estimation, synchronized vector measurements, maximum likelihood estimation, choice of weights, linear state estimation*.

For citation: Bartolomey P.I., Semenenko S.I. State estimation method development for SCADA and synchronized phasor measurements within power system. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21 (3-4):68-78. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-68-78.

Введение

Классические методы оценивания состояния (ОС) опираются на измерения действующих значений токов и напряжений узлов, измерения активных и реактивных составляющих мощностей узлов и ветвей. Ввиду нелинейности связи тока, напряжения и мощности, задача ОС оказывается нелинейной, что вносит значительные трудности в ее практическую реализацию. Методы решения этой задачи оказываются итерационными, неробастными, недостаточно надежными, потенциально длительными для расчета. Как вывод, актуальными стали вопросы перехода от итерационного решения задачи ОС к прямому. Основным способом такого перехода является избавление от измерений мощности. Развитие и внедрение средств синхронизированных векторных измерений (СВИ) позволили использовать в задаче ОС только измерения комплексных величин токов и напряжений, что обеспечило появление методов комплексного линейного оценивания состояния (ЛОС) [1–3].

Наиболее популярные методы ОС используют весовые коэффициенты измерений, которые выбираются на основе погрешностей средств измерений. Все измерения, входящие в классическое ОС, имеют данные об относительной погрешности. Однако для измерений фазных углов токов и напряжений, которые появились в системе СВИ, невозможно записать относительную погрешность ввиду их природы. Особенно актуально этот вопрос проявляется в задаче указанного комплексного линейного ОС. Следовательно, важным является вопрос о совместном использовании измерений фазных углов и остальных классических измерений.

Существуют энергосистемы [1–3], в которых полная наблюдаемость обеспечивается полностью за счет СВИ. В таких сетях реализуется идея использования комплексных значений токов и напряжений, полученных от измерительных устройств, для выполнения ЛОС. Для российских энергосистем, характеризующихся разветвленностью и большой протяженностью, в настоящее время пока нет возможности реализации идеи ЛОС из-за отсутствия достаточного количества устройств измерительного оборудования *PMU* для обеспечения наблюдаемости. Мало того, сама возможность ЛОС еще не обоснована.

На данный момент СВИ не являются повсеместными ввиду их дороговизны в прошлом, а также инертности перехода к новым технологиям. Соответственно

приходится рассматривать вопросы плавного перехода к совместному использованию СВИ и система сбора и управления данными *SCADA*, которое требует разработки методов гибридного ОС. Именно этим вопросам и посвящена настоящая работа. К тому же, в данной статье рассматриваются вопросы развития ОС с тем, чтобы при появлении локального участка сети, наблюдаемого по *PMU*, появлялась возможность использовать ЛОС наиболее эффективно.

Метод максимального правдоподобия в задаче ОС

Несмотря на недавние публикации о неквадратичных методах [4] и развитии расчетных процедур [5], метод взвешенных наименьших квадратов является наиболее используемым методом, применяемым на практике для ОС. Он заключается в минимизации взвешенной суммы квадратов отклонений оцениваемых связанных между собой величин от измерений, что может быть записано в виде [6–7]

$$\Phi_2(X) = \sum_{i=1}^{M} \alpha_i \cdot (y_i(X) - y_i^{\text{ТИ}})^2 \to \min$$
$$\{h_j(X) = 0, \quad j = 1...K, \tag{1}$$

где X – вектор базовых параметров состояния, размерностью N, через которые можно выразить все остальные параметры; M – количество измерений, используемых в задаче ОС; $y_i^{\text{ТИ}}$ – значение телеизмерения (ТИ) параметра; $y_i(X)$ – аналитическое выражение измеряемого параметра через независимые переменные X; α_i – весовой коэффициент; $\{h_j(x) = 0, \quad j = 1...K$ – ограничения, отражающие заведомо точную информацию. Для наблюдаемости требуется избыточность измерений, или $M > N$, при невырожденности системы $\{y_i(X) = y_i^{\text{ТИ}}, \quad i = 1...M$. Применительно к энергосистеме под X, чаще всего, понимается вектор модулей и фазовых углов напряжений; $y_i^{\text{ТИ}}$ – измерения узловых и линейных значений модулей токов, активных и реактивных составляющих мощностей, модулей узловых напряжений; $y_i(X)$ – аналитическое выражение измеряемого параметра только через модули и фазы напряжений; $\{h_j(x) = 0, \quad j = 1...K$ – ограничения подстанций с нулевым отбором мощности, ограничения на коэффициенты мощности.

От выбора коэффициентов α_i напрямую зависит эффективность процедуры ОС. Коэффициенты α_i выбираются каждый раз, исходя из опыта эксплуатации (эмпирически), экспертом на основании рекомендаций по их выбору (эвристически) [1, 8]. На сегодняшний день эти рекомендации предлагают устанавливать значения α_i обратно пропорционально квадрату относительной погрешности измерения θ_i, которая указана в паспорте измерительного прибора. До недавнего момента эти методы выбора весовых коэффициентов эффективно справлялись с поставленной задачей, предположительно, за счет накапливаемого опыта эксплуатации соответствующих программных комплексов. Мало того, до настоящего времени, погрешности всех приборов для измерения величин энергосистемы метрологически нормируются по относительной погрешности. Появившиеся недавно устройства СВИ, давая возможность измерять фазовый электрический угол комплексных величин, который не может быть нормирован по относительной погрешности, выявили новую проблему по учету этих углов в ОС.

Для того, чтобы обосновать подход к выбору весовых коэффициентов измерений разнородных параметров, рассмотрим метод наименьших квадратов с позиции метода

максимального правдоподобия. Рассмотрим энергосистему, для которой выполняется задача ОС. Пусть, как и в предыдущей задаче, в энергосистеме выполнено M телеизмерений. Поскольку все эти измерения содержат погрешности, предположим, что для всех этих погрешностей заданы плотности вероятности $\rho_i(\Delta y_i)$, где i – номер измерения от 1 до M; Δy_i – случайная величина ошибки, которая обычно принимается непрерывной. Тогда оказывается, что

$$y_i = y_i^{\text{ТИ}} + \Delta y_i, \tag{2}$$

где y_i – оцениваемое значение измеряемого параметра. Из (1) следует, что

$$\Delta y_i = y_i - y_i^{\text{ТИ}}. \tag{3}$$

Предположим, что все измерения осуществляются независимо друг от друга, то есть погрешности измерений являются независимыми случайными величинами. Тогда, для определения плотности вероятности всей системы измерений $\rho_{\Pi}(\Delta Y)$, плотности вероятности вектора таких величин ΔY перемножаются [9] и, следовательно,

$$\rho_{\Pi}(\Delta Y) = \prod_{i=1}^{M} \rho_i(\Delta y_i). \tag{4}$$

Эту функцию чаще всего принимают в качестве функции правдоподобия в методе максимального правдоподобия [9].

Также предположим: гарантированно известно, что параметры y_i связаны между собой системой уравнений

$$\left\{ f_j(X,Y) = 0, \quad j = 1...L, \right. \tag{5}$$

где $f_j(X,Y)$ – функции связи, которые определяются информацией о конкретных физических явлениях и объектах; L – число уравнений связи. Следовательно задачу оптимизации для метода максимального правдоподобия можно записать в виде

$$\begin{gathered} \Phi(Y) = \prod_{i=1}^{M} \rho_i(y_i - y_i^{\text{ТИ}}) \to \max \\ \left\{ f_j(X,Y) = 0, \quad j = 1...L. \right. \end{gathered} \tag{6}$$

Решением этой оптимизационной задачи является оценка параметров X.

Если предположить, что все случайные величины Δx_i являются нормально распределенными, т.е. иными словами можно записать

$$\rho_i(\Delta y_i) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_i} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta y_i^{\,2}}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_i^{\,2}} \right), \tag{7}$$

где σ_i – дисперсия случайной величины Δy_i, тогда, учитывая что экспоненциальная функция и умножение на положительную константу не влияют на отношение порядка, а также что при произведении степеней показатели степени складываются, можно переписать выражение (5) в форме метода наименьших квадратов:

$$\begin{gathered} \Phi(Y) = \sum_{i=1}^{M} \frac{1}{\sigma_i^{\,2}} \cdot (y_i - y_i^{\text{ТИ}})^2 \to \min \\ \left\{ f_j(X,Y) = 0, \quad j = 1...L. \right. \end{gathered} \tag{8}$$

Переход от максимизации (5) к минимизации (7) был осуществлен при помощи смены знака в показателе экспоненты. Задача (8) уже сама по себе является задачей взвешенных

наименьших квадратов. Чтобы окончательно преобразовать выражение (8) к выражению (1), дополнительно требуется предположить, что существует эквивалентное преобразование

$$\left\{ f_j(X,Y)=0, \quad j=1...L \right. \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} y_j(X)=y_j, & j=1...M, \\ h_j(X)=0, & j=1...K. \end{cases} \tag{9}$$

Из выражений (1)–(8) видно, что метод наименьших квадратов (1) является частным случаем метода максимального правдоподобия. Следовательно, весовые коэффициенты α_i оказываются полностью эквивалентными величине, обратной квадрату величины дисперсии $1/\sigma_i^2$.

Перечислим допущения, сделанные при переходе от метода максимального правдоподобия к методу наименьших квадратов.

1. Плотность вероятности всех погрешностей заведомо известна, неизменна во времени и является нормальным распределением.
2. Система ограничений в форме равенств в задаче оптимизации должна выполняться при любых условиях, и сомнений в ее правильности быть не должно.
3. Должны быть наперед известными и неизменными дисперсии.
4. Не должно существовать или должна быть заранее известна величина σ_i систематической погрешности измерений.

Все указанные допущения содержатся в методе наименьших квадратов (1), описанном в начале раздела, хотя они приняты там неявным образом.

Выбор весовых коэффициентов для метода взвешенных наименьших квадратов в задаче ОС

Как уже было отмечено, для всех измерений паспортом приборов нормируется относительная погрешность θ_i. Традиционно в методе наименьших квадратов (1) весовые коэффициенты рекомендуется [1,8] выбирать как

$$\alpha_i = \frac{1}{(\theta_i \cdot m_i)^2}, \tag{10}$$

где m_i – масштабирующий коэффициент измерения, который выбирается исходя из физической природы измеряемой величины. Например, для модулей напряжений, модулей токов и составляющих мощностей эти коэффициенты будут отличаться, потому что они являются разнородными. Строго говоря, основная проблема описанной методики заключается в том, что она полностью применима только при условии, что θ_i является не относительной, а абсолютной погрешностью, но обычно она применяется к относительным погрешностям. Эта проблема ранее не проявлялась, так как все измерения были нормированы по относительной погрешности. Однако относительно недавнее появление СВИ привело к возможности измерять величины, которые принципиально могут нормироваться только по абсолютной погрешности, а именно, фазовые углы электрических величин. Применение старого подхода (9) к новым системам измерений приводит к тому, что накопленный опыт, на базе которого были выбраны масштабирующие коэффициенты m_i, оказывается неприменимым и, как вывод, это может привести к непредсказуемому искажению режима в результате его ОС. Хуже того, в текущей парадигме ОС невозможно даже нормировать это искажение режима, поскольку мера отклонения режима от эталона оказывается неопределенной.

В настоящей работе предлагается заменить традиционный метод выбора весовых коэффициентов, чтобы учесть разнородность параметров, которая, в первую очередь,

проявляется при совместном использовании модулей и фазных углов электрических величин. Суть предлагаемого метода состоит в том, что следует разделить все измерения на M_Θ измерений с нормируемой абсолютной погрешностью $\Theta_i, \quad i = 1...M_\Theta$, и M_θ измерений с нормируемой относительной погрешностью $\theta_i, \quad i = 1 + M_\Theta ... M$. Для измерений с нормируемой абсолютной погрешностью предлагается рассчитывать весовой коэффициент как

$$\alpha_i = \frac{1}{\Theta_i^{\,2}}, \tag{11}$$

а для измерений с нормируемой относительной погрешностью как

$$\alpha_i = \frac{1}{(\theta_i \cdot y_i^{\text{ТИ}})^2}. \tag{12}$$

Соответственно, целевая функция и система ограничений примет вид:

$$\begin{gathered} \Phi(Y) = \sum_{i=1}^{M} \alpha_i \cdot (y_i - y_{\text{i}}^{\text{ТИ}})^2 \to \min \\ \left\{ f_j(X, Y) = 0, \quad j = 1...L, \right. \end{gathered} \tag{13}$$

где α_i – весовой коэффициент, соответствующий (11) для измерений с нормируемой абсолютной погрешностью и (12) для измерений с нормируемой относительной погрешностью.

Покажем, как был выполнен переход от выражения (8), где в качестве весовых коэффициентов используются $1/\sigma_i^{\,2}$ к весовым коэффициентам, записанным в выражениях (11)–(12). Для этого примем первую группу допущений: нормируемые абсолютные погрешности соответствуют доверительному интервалу измеряемой величины. Это можно математически записать, как

$$\Theta_i = S_i \cdot \tau_i \approx \sigma_i \cdot \tau'_i, \tag{14}$$

где S_i – выборочное стандартное отклонение, соответствующее серии измерений, предполагаемо проведенных для поверки прибора; τ_i – коэффициент Стьюдента, соответствующий выполненной серии измерений и требуемой надежности измерений (например 99%); τ'_i – коэффициент Стьюдента, соответствующий бесконечному числу измерений и той же надежности, что и для τ_i. Знак равенства в (14) показывает, что измерительные приборы предполагаются поверенными серией испытаний по более точному прибору, а знак примерного равенства – что при такой поверке было сделано бесконечное число испытаний [10]. С учетом того, что в паспортах приборов указывается наибольшая погрешность [10], данные допущения представляются приемлемыми для дальнейших рассуждений.

Второй группой допущений примем: нормируемаяе относительая погрешность может быть рассчитана как

$$\theta_i = \frac{S_i \cdot \tau_i}{y_i^{\text{Э}}} \approx \frac{\sigma_i \cdot \tau'_i}{y_i^{\text{Э}}} \approx \frac{\sigma_i \cdot \tau'_i}{y_i^{\text{ТИ}}}, \tag{15}$$

где $y_i^{\text{Э}}$ – эталонное значение измеряемого параметра; $y_i^{\text{ТИ}}$ – фактическое значение измерения с погрешностью. Первый знак равенства выражения (15) означает допущение, что измерительные приборы предполагаются поверенными серией испытаний по более точному прибору с нормировкой по эталонным значениям. Следующий знак примерного

равенства показывает предположение, что было выполнено бесконечное число испытаний при поверке. Второй знак примерного равенства отражает предположение, сделанное в данной работе, о том, что эталонное значение приближенно равно телеизмерению.

Преобразование координат для выполнения линейного ОС

При рассмотрении ОС с участием СВИ появилась возможность сформулировать задачу ЛОС. В зарубежных публикациях [1–3] рассматривается следующий подход к ЛОС. Предполагается, что *PMU* обеспечивают получение действительных и мнимых значений токов и напряжений. Положим, что в ветви энергосистемы, связывающей узлы s и t, со стороны узла s установлен *PMU*, который измеряет комплексные значения напряжения узла s и тока ветви $s-t$. В таком случае для этого *PMU* можно записать фрагмент целевой функции и системы ограничений (13):

$$\phi_{PMU}(Y)=\alpha_{U\Re}\cdot(y_{U\Re}-y_{U\Re}^{\text{ТИ}})^2+\alpha_{U\Im}\cdot(y_{U\Im}-y_{U\Im}^{\text{ТИ}})^2+\alpha_{I\Re}\cdot(y_{I\Re}-y_{I\Re}^{\text{ТИ}})^2+\alpha_{I\Im}\cdot(y_{I\Im}-y_{I\Im}^{\text{ТИ}})^2$$

$$\begin{cases}-g_{ss}\cdot U_s'+b_{ss}\cdot U_s''+g_{st}\cdot U_t'-b_{st}\cdot U_t''=I_{st}',\\ -b_{ss}\cdot U_s'-g_{ss}\cdot U_s''+b_{st}\cdot U_t'+g_{st}\cdot U_t''=I_{st}'',\\ y_{U\Re}-U_s'=0,\quad y_{U\Im}-U_s''=0,\\ y_{I\Re}-I_{st}'=0,\quad y_{I\Im}-I_{st}''=0,\end{cases}\tag{16}$$

где U_s' и U_s'' – действительная и мнимая составляющие напряжения узла s; U_t' и U_t'' – действительная и мнимая составляющие напряжения узла t; I_{st}' и I_{st}'' – действительная и мнимая составляющие тока, втекающего в узел s из ветви $s-t$; g_{ss} и b_{ss} – действительная и мнимая составляющие собственной проводимости ветви $s-t$ в узле s; g_{st} и b_{st} – действительная и мнимая составляющие собственной проводимости ветви $s-t$ в узле t; $\alpha_{U\Re}$, $\alpha_{U\Im}$, $\alpha_{I\Re}$ и $\alpha_{I\Im}$ – весовые коэффициенты измерений, соответственно, действительных и мнимых составляющих напряжений и токов.

Серьезным преимуществом такого подхода является возможность переформулировать систему (16) в терминах классической постановки задачи метода наименьших квадратов (1). Если в рассматриваемой энергосистеме имеется полная наблюдаемость при помощи только *PMU*, то такой подход приводит к решению систем линейных уравнений, что делает саму задачу ОС решаемой быстро, робастно и без применения итерационных методов.

Однако не менее серьезным недостатком такого подхода является неизвестность весовых коэффициентов измерений. С точки зрения указанного выше подхода метода максимального правдоподобия (13), такой способ формулирования целевой функции и системы ограничений оказывается некорректным ввиду того, что для СВИ указываются не погрешности действительной и мнимой составляющих векторных измерений, но задаются относительные погрешности их модуля и абсолютные погрешности их угла.

Запишем фрагмент целевой функции и системы ограничений (16) для случая, когда измерениями являются модули и углы комплексных параметров:

$$\phi_{PMU}(Y)=\alpha_V\cdot(y_V-y_V^{\text{ТИ}})^2+\alpha_\delta\cdot(y_\delta-y_\delta^{\text{ТИ}})^2+\alpha_I\cdot(y_I-y_I^{\text{ТИ}})^2+\alpha_\psi\cdot(y_\psi-y_\psi^{\text{ТИ}})^2$$

$$\begin{cases}-g_{ss}\cdot V_s\cdot\cos(\delta_s)+b_{ss}\cdot V_s\cdot\sin(\delta_s)+g_{st}\cdot V_t\cdot\cos(\delta_t)-b_{st}\cdot V_t\cdot\sin(\delta_t)=I_{st}\cdot\cos(\psi_{st}),\\ -b_{ss}\cdot V_s\cdot\cos(\delta_s)-g_{ss}\cdot V_s\cdot\sin(\delta_s)+b_{st}\cdot V_t\cdot\cos(\delta_t)+g_{st}\cdot V_t\cdot\sin(\delta_t)=I_{st}\cdot\sin(\psi_{st}),\\ y_V-V_s=0,\quad y_\delta-\delta_s=0,\\ y_I-I_{st}=0,\quad y_\psi-\psi_{st}=0,\end{cases}\tag{17}$$

где V_s и δ_s – модуль и угол напряжения узла s; V_t и δ_t – модуль и угол напряжения узла t; I_{st} и ψ_{st} – модуль и угол тока, втекающего в узел s из ветви $s-t$; α_V, α_δ, α_I

и α_ψ – весовые коэффициенты для модуля напряжения, угла напряжения, модуля тока и угла тока как комплексной величины.

Подход (17) описанный в работе [1], несмотря на корректность записи, обладает важным недостатком по сравнению с подходом (16) – он предполагает итерационное решение системы нелинейных уравнений, вне зависимости от того, какого типа измерения (*SCADA* или СВИ) используются.

Для того, чтобы совместить линейность подхода (16) и статистическую корректность подхода (17), предлагается формулировка задачи, представленная в (18). Важно отметить, что в формулировке (18) сделано допущение, не являющееся грубым, а именно: предполагается, что отклонение измерений модулей и углов комплексных величин от их эталонных значений оказывались малыми величинами. Это позволило выполнить поворот системы координат действительной и мнимой компонент комплексных параметров таким образом, чтобы действительные компоненты u'_s и i'_{st} соответствовали значениям измерений модуля, а мнимые компоненты u''_s и i''_{st} соответствовали значениям измерений угла, помноженного на измерение модуля.

$$\phi_{PMU}(Y) = \alpha_V \cdot (y_V - y_V^{\text{ТИ}})^2 + \alpha_\delta \cdot (y_\delta - y_\delta^{\text{ТИ}})^2 + \alpha_I \cdot (y_I - y_I^{\text{ТИ}})^2 + \alpha_\psi \cdot (y_\psi - y_\psi^{\text{ТИ}})^2$$

$$\begin{cases} -g_{ss} \cdot U'_s + b_{ss} \cdot U''_s + g_{st} \cdot U'_t - b_{st} \cdot U''_t = I'_{st}, \\ -b_{ss} \cdot U'_s - g_{ss} \cdot U''_s + b_{st} \cdot U'_t + g_{st} \cdot U''_t = I''_{st}, \\ y_V - u'_s = 0, \quad y_\delta - \dfrac{1}{y_V^{\text{ТИ}}} \cdot u''_s = 0, \\ u'_s = U'_s \cdot \cos(y_\delta^{\text{ТИ}}) - U''_s \cdot \sin(y_\delta^{\text{ТИ}}), \\ u''_s = U'_s \cdot \sin(y_\delta^{\text{ТИ}}) + U''_s \cdot \cos(y_\delta^{\text{ТИ}}), \\ y_I - i'_{st} = 0, \quad y_\psi - \dfrac{1}{y_I^{\text{ТИ}}} \cdot i''_{st} = 0, \\ i'_{st} = I'_{st} \cdot \cos(y_\psi^{\text{ТИ}}) - I''_{st} \cdot \sin(y_\psi^{\text{ТИ}}), \\ i''_{st} = I'_{st} \cdot \sin(y_\psi^{\text{ТИ}}) + I''_{st} \cdot \cos(y_\psi^{\text{ТИ}}). \end{cases} \tag{18}$$

Формулировка (18) совместно с подходом метода максимального правдоподобия позволяет выполнить оценку состояния при условии, что сеть наблюдаема с точки зрения СВИ следующим образом:

$$diag(Y^{\text{ТИ}})^{-1} \cdot A \cdot X = D, \tag{19}$$

где $Y^{\text{ТИ}}$ – вектор телеизмерений; A – информационна матрица; X – вектор параметров состояния; D – вектор, элементы которого – единицы.

Суть метода, указанного в (19), состоит в комплексном оценивании состояния, когда уравнениям в качестве весового коэффициента даются комплексные значения самих измерений. Это дает основание назвать его как «линейный метод оценивания состояния, взвешенный по измерениям» (*Measurements Weighted Linear State Estimation*), который сокращенно будем называть «*MWLSE*».

В работе [11] показан метод ОС, в котором предполагается, что для каждой группы измерений организуется своя процедура оценивания: линейная – для измерений СВИ и нелинейная – для *SCADA*. Сначала выполняется линейное ОС на более точных измерениях СВИ – это и будет первым уровнем ОС. Вторым выполняется нелинейное ОС с фиксацией результатов ОС первого уровня в качестве констант. Тестовые расчеты, проведенные для данного метода, показали, что двухуровневое ОС приводит к существенному увеличению вычислительной скорости при высокой точности

полученного потокораспределения.

Предложенный метод *MWLSE* позволяет более точно выполнять линейное ОС, необходимое для двухуровневого ОС. Благодаря указанному в (19) выбору весовых коэффициентов, линейное ОС, выполняемое для данных от СВИ, становится более точным, что является критичным для выполнения второго уровня нелинейного ОС по данным *SCADA*.

Вычислительный эксперимент

Рассмотрим электрическую сеть, показанную на рис. 1, где в разделе *а)* изображен эталонный режим токораспределения, *б)* – эталонный режим с указанием потокораспределения, *в)* – пример измерений с погрешностями. Предполагается, что в узлах 1 и 3 установлены *PMU*, измеряющие напряжения в этих узлах и токи в линиях 1-2 и 2-3 со стороны *PMU*.

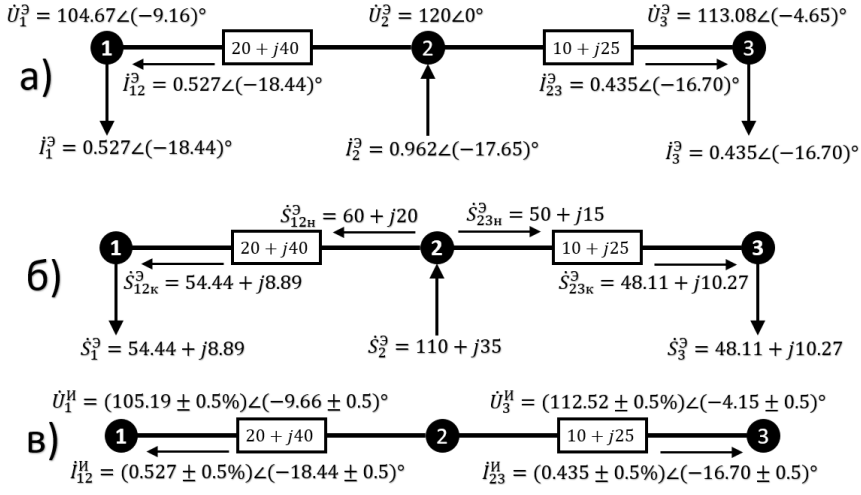

Рис. 1. Пример электрической сети 110 кВ для сопоставления ОС

Для этой сети и для этого состава измерений выполним линейную ОС двумя методами. Первый метод предполагает формулирование целевой функции согласно подходу (16). В связи с тем, что выбор используемых в (16) весовых коэффициентов в литературе не представлен, в рассматриваемом примере были выбраны коэффициенты так, как это было описано в работе [1], где этот метод назван «линейная оценка состояния» (*Linear State Estimation – LSE*). Результат такого ОС показан на рис. 2, где получившиеся токораспределения *а)* и потокораспределения *б)* помечены верхним индексом «*LSE*». В рамке указан результат сопоставления расчетного режима по ОС с эталонным режимом в соответствии с критерием

$$S = \sum_{i=1}^{L}\left(\left(\left|\dot{S}_{iн}^{LSE} - \dot{S}_{iн}^{Э}\right|\right)^2 + \left(\left|\dot{S}_{iк}^{LSE} - \dot{S}_{iк}^{Э}\right|\right)^2\right), \qquad (20)$$

где L – число линий, а индексы «н» и «к» относятся к началу и концу линии.

Указанный критерий (20) является отражением меры отклонения оцененного режима от эталона по мощностям линий, который в наибольшей степени учитывает погрешность расчета режима при выборе управляющих воздействий, связанных с изменением потокораспределения. В результате расчета первым методом значение данного критерия оказалось равным 53,095.

В качестве второго метода рассматривался предлагаемый метод *MWLSE* (19), который был протестирован на той же схеме и тех же измерениях с целью сопоставления

с первым методом. Результат расчета показан на рис. 3, где также токораспределения *а)* и потокораспределения *б)*, в свою очередь, отмечены верхним индексом «ЛОС». Для этого метода значение критерия (20) оказалось равным 0,826, что почти на 2 порядка меньше, чем у первого метода.

Как видно из сопоставления двух конечных результатов ОС двумя методами, можно уверенно судить о намного более высокой точности метода *MWLSE*.

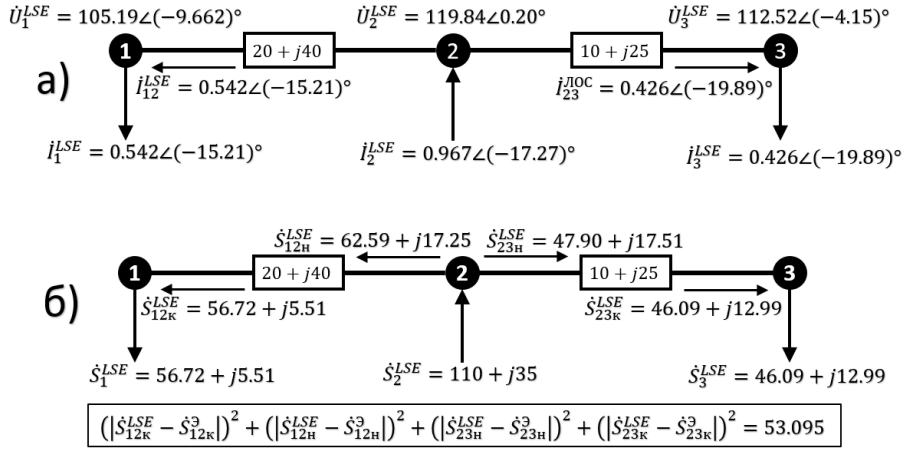

Рис. 2. Результат ОС для измерений, изображенных на рис. 1, *в)* по первому методу

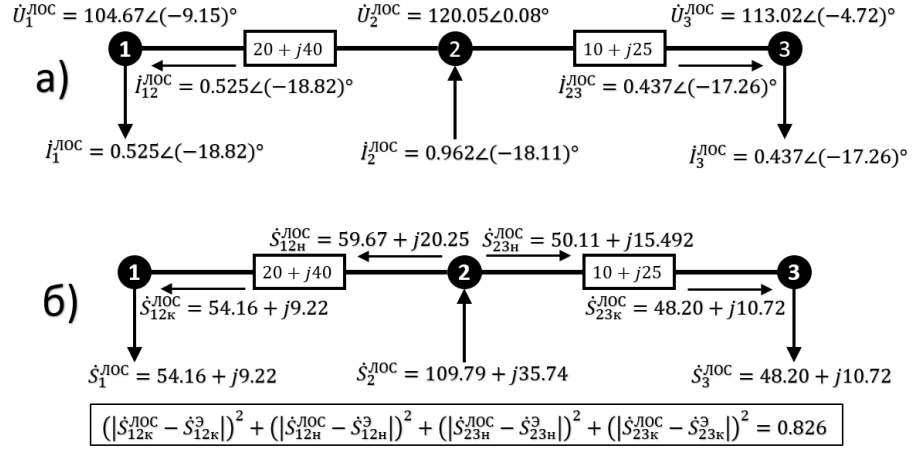

Рис. 3. Результат ОС для измерений, изображенных на рис 1 по методу *MWLSE*

Для убедительности метод протестирован на ряде тестовых задач *IEEE*, а именно для сетей *IEEE*-14, *IEEE-RTS*96, *IEEE*-30, *IEEE*-57, *IEEE*-118. Результаты испытаний показали более высокую точность *MWLSE*, причем, было выявлено следующее. Во-первых, оказалось, что точность предложенного метода тем выше, в сравнении с методом *LSE*, чем выше класс напряжения рассматриваемой сети. Во-вторых, было замечено, что сравнительная точность предложенного метода снижалась при утяжелении режима, но все равно оставалась выше, чем у других методов.

Заключение

Как известно, в ЭЭС для оценки состояния по телеметрии *SCADA* наибольшее применение находит метод взвешенных наименьших квадратов. Появившиеся в последние годы системы СВИ позволили перейти к ускоренной линейной оценке

состояния *LSE*. Однако этот метод не гарантирует высокой точности конечного результата.

Предложенный в данной работе метод оценивания состояния, названный *MWLSE*, предназначен для сетей, наблюдаемых при помощи *PMU* в системе информационного обеспечения *WAMS*. Он является таким же робастным и вычислительно быстрым, как и метод линейного оценивания состояния *LSE*, используемый в зарубежных энергосистемах, но оказался намного более точным во всех рассмотренных случаях.

Литература

1.D.A. Haughton, G.T. Heydt, "A Linear State Estimation Formulation for Smart Distribution Systems," in IEEE Transactions on Power Systems. May 2013. Vol. 28. no. 2. P. 1187–1195.

2. L. Zhang, A. Bose, A. Jampala, V. Madani, J. Giri, "Design, Testing, and Implementation of a Linear State Estimator in a Real Power System," in IEEE Transactions on Smart Grid. July 2017. Vol. 8, no. 4. P. 1782–1789.

3. S.G. Ghiocel et al. "Phasor-Measurement-Based State Estimation for Synchrophasor Data Quality Improvement and Power Transfer Interface Monitoring," in IEEE Transactions on Power Systems. March 2014. Vol. 29, no. 2. P. 881–888.

4. Хохлов М.В. Робастное оценивание состояния электроэнергетических систем на основе неквадратичных критериев: дис. ... канд. техн. наук. Сыктывкар, 2010. С. 132.

5. Максименко Д.М., Машалов Е.В., Неуймин В.Г. Оценивание состояния на базе оптимизационного алгоритма в ПК RastrWin3 // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2013. №2(69). С. 36–44.

6. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976.

7. Schweppe F.C., Wildes J. Power system static state estimation. Part 1: exact model. // IEEE Trans. On Power Systems. 1970. №1. P.120–125.

8. Прихно В.Л., Черненко П.А. Оперативный расчет режима энергосистемы по данным телеизмерений. Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1982. С.70–75.

9. Никулин М.С. Отношения правдоподобия критерий // Математическая энциклопедия / Виноградов И. М. (гл. ред.). М.: Советская энциклопедия, 1984. Т. 4. С.151–1216.

10. ГОСТ Р 8.000-2015. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные положения.

11. P.I. Bartolomey and S.I. Semenenko. "Power Systems State Estimation Acceleration on the Basis of the Synchronized Phasor Measurements in the Power System Steady State Control Tasks," 2018 // International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA). Moscow, 2018. P. 1–10.

Авторы публикации

Бартоломей Петр Иванович – д–р техн. наук, профессор кафедры «Автоматизированные электрические системы» Уральского Федерального Университета (УрФУ) имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург.

Семененко Сергей Игоревич – старший преподаватель кафедры «Автоматизированные электрические системы» Уральского Федерального Университета (УрФУ) имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург.

References

1.D. A. Haughton and G. T. Heydt, "A Linear State Estimation Formulation for Smart Distribution Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1187-1195, May 2013.

2.L. Zhang, A. Bose, A. Jampala, V. Madani and J. Giri, "Design, Testing, and Implementation of a Linear State Estimator in a Real Power System," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 4, pp. 1782-1789, July 2017.

3.S. G. Ghiocel et al., "Phasor-Measurement-Based State Estimation for Synchrophasor Data Quality Improvement and Power Transfer Interface Monitoring," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, no. 2, pp. 881-888, March 2014.

4.Khokhlov M. V, Robust assessment of state of electric power systems based on non-quadratic criteria // Dissertation candidate. tech. sciences. - Syktyvkar, 2010. - P. 132.

5.Maksimenko D.M., Mashalov E.V., Neuimin V.G. State estimation based on optimization algorithm using RastrWin3 software // Izvestiya NTC Edinoj energeticheskoj sistemy, №2 (69), 2013. - p. 36-44.

6.Gamm A.Z. Statistical methods for assessing the state of electric power systems // Moscow: Nauka, 1976.

7.Schweppe F.C., Wildes J. Power system static state estimation. Part 1: exact model. // IEEE Trans. On Power Systems, №1, 1970. - P.120-125.

8.Prikhno V.L., Chernenko P.A. Operational calculation of power system mode according to the telemetry data // Irkutsk: SEI SB AS USSR, 1982. - P. 70-75.

9.Nikulin M.S. Likelihood Relations Criterion // Mathematical Encyclopedia / Vinogradov I.M. (Ch. Ed.). - Moscow.: Soviet Encyclopedia, 1984. - Vol. 4. - p. 151. - 1216 p.

10. Russian State Standard GOST R 8.000-2015 State system for ensuring the uniformity of measurements (GSI). The main provisions.

11. P. I. Bartolomey and S. I. Semenenko, "Power Systems State Estimation Acceleration on the Basis of the Synchronized Phasor Measurements in the Power System Steady State Control Tasks," 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA), Moscow, 2018, pp. 1-10.

Authors of the publication

Petr I. Bartolomey – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Sergey S. Semenenko – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Поступила в редакцию ***09 января 2019 г.***