

Применение метода динамического оценивания состояния для решения задач диспетчерского управления электроэнергетической системы

А.М. ГЛАЗУНОВА

Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН

Россия

glazunova@isem.sei.irk.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Динамическое оценивание состояния, критические измерения, грубые ошибки, краткосрочное прогнозирование режима.

1 ВВЕДЕНИЕ

Оценивание состояния (ОС) электроэнергетической системы – это расчет установившегося режима, который выполняется по оперативной информации, полученной с помощью SCADA-системы и регистраторов комплексных электрических величин (PMU – Phasor Measurement Units) [1]. Оперативная информация (срез) представляется в виде вектора измерений и выглядит следующим образом:

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

где U_i – модули узловых напряжений; P_i , Q_i – инъекции активных и реактивных мощностей в узлах; P_{ij} , Q_{ij} – перетоки мощностей в трансформаторах и линиях, δ_i – фазы напряжений в тех узлах схемы, где установлены регистраторы. Существует большое количество методов оценивания состояния режимов ЭЭС. В каждом из методов важнейшим условием является достижение минимальной разности между полученными оценками параметров режима $\hat{y}$ и измеренными значениями $\bar{y}$ при соблюдении законов Ома и Кирхгофа.

Для повышения качества результатов задачи ОС, работающей в темпе процесса, алгоритмы ОС, использующие один срез, заменяются алгоритмами, которые могут обрабатывать информацию множества срезов [2,3,4]. Такой алгоритм ОС, далее динамическое оценивание состояния, позволяет:

- учитывать взаимосвязи между изменяющимися во времени параметрами режима;
- использовать для неизмеренных компонент вектора состояния их значения, вычисленные в предшествующий момент времени (по предыдущему срезу);
- повысить устойчивость к сбоям и потерям данных;
- прогнозировать параметры режима на короткий срок времени.

Целью работы является решение трех задач диспетчерского управления с помощью динамического оценивания состояния. Использование результатов этих задач повышает эффективность управления электроэнергетической системой (ЭЭС). Способность динамического оценивания состояния учитывать взаимосвязи между изменяющимися во времени параметрами режима позволяет определять грубые ошибки в критических измерениях. Эта проблема является очень важной, т.к. удовлетворительные результаты при оценивании состояния режима достигаются только при отсутствии грубых ошибок в измерениях. Поэтому задача обнаружения грубых ошибок в измерениях является первостепенной задачей для улучшения результатов оценивания состояния ЭЭС. В процессе работы динамического оценивания состояния накапливается статистическая информация об измерениях. Анализ этой информации выявляет компоненты вектора состояния, которые могут быть исключены из матрицы производных. Уменьшение матрицы производных, что означает уменьшение

размерности задачи, ускоряет процесс оценивания состояния режима. Наличие статистической информации позволяет выполнить краткосрочное прогнозирование режима ЭЭС. Результаты прогнозирования применяются для выработки управляющих воздействий на некоторое время вперед, а также используются в качестве “псевдоизмерений” в задаче оценивания состояния.

В статье рассматривается вопрос применения фильтра Калмана для динамического оценивания состояния, приведены целевая функция и алгоритм динамического оценивания состояния, описаны три задачи, которые решаются с помощью динамического оценивания состояния, показаны численные результаты и сделаны основные выводы.

2 ДИНАМИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ

2.1 Фильтр Калмана

Для динамического оценивания состояния применяется фильтр Калмана [5], который дает оптимальную оценку состояния ЭЭС в реальном времени, основываясь на измерениях содержащих погрешности, и выполняет краткосрочное прогнозирование параметров режима. Математическая модель динамической линейной системы с дискретным временем, в которой учитываются случайные возмущения входного воздействия и случайные ошибки измерений имеет вид

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + \xi_{\phi_k} \quad (2)$$

Последовательность наблюдений определяется соотношением

$$y_k = y(x_k) + \xi_{y_k} \quad (3)$$

В (2), (3) x_k – вектор состояния системы в k -ый момент времени (набор параметров режима, который однозначно определяет все остальные параметры режима), Φ_k – матрица перехода из k -ого состояния в $k+1$, $y(x_k)$ – зависимость измерений от вектора состояния, ξ_{ϕ_k} – шум модели, ξ_{y_k} – ошибка измерений.

Вектор x_k имеет размерность $n = 2N - 2$, где N – число узлов. Вектор измерений y_k имеет размерность m . Φ_k представляет собой заданную матрицу известной размерности. Векторы возмущений ξ_{ϕ_k} размерности n и ошибок измерений ξ_{y_k} размерности m представляют собой векторные случайные процессы типа белого шума. Симметричные, неотрицательно определенные матрицы ковариаций этих процессов заданы

$$E(\xi_{\phi_k})(\xi_{\phi_k}^T) = W_k, \quad \xi_{\phi_i} \in N(0, \sigma_{\phi_i}^2) \quad E(\xi_{y_k})(\xi_{y_k}^T) = R_k, \quad \xi_{y_i} \in N(0, \sigma_{y_i}^2),$$

где $\sigma_{y_i}^2$ – дисперсия измерения, $\sigma_{\phi_i}^2$ – дисперсия шума модели.

Ошибки измерений и вектор возмущений взаимно не коррелированы. Ошибка оценивания вектора состояния определяется как разность истинной величины и полученной оценки

$$\Delta x = x - \hat{x} \quad (4)$$

Матрица ковариации определяется соотношением

$$P = E((\Delta x \Delta x^T)).$$

Для построения рекуррентных уравнений предполагается, что $\hat{x}_k$ и P_k в момент времени k известны. При $k = 1$, P_k вычисляется по формуле [2]

$$P_k = (H^T R^{-1} H)^{-1}, \quad (5)$$

где H – матрица Якоби,

Вектор $\hat{x}_k$ принимается равным измерениям или псевдоизмерениям. Далее величина $\hat{x}$ экстраполируется в соответствии с уравнением:

$$\tilde{x}_{k+1} = \Phi_k \hat{x}_k \quad (6)$$

При этом возмущения ξ_{ϕ_k} остаются неучтенными. Для выяснения связи между экстраполированным значением $\tilde{x}$ и знаниями об интересующем векторе x в уравнение (6) $\mathcal{E}$ подставляется из (4) $\tilde{x}_{k+1} = \Phi_k (\Delta x_k - \mathcal{E}_k) = \Phi_k x_k - \Phi_k \Delta x_k$. Из уравнения (2) $\Phi x_k = x_{k+1} - \xi_{\phi_k}$, следовательно

$$\tilde{x}_{k+1} = x_{k+1} - \Phi_k \Delta x_k - \xi_{\phi_k}. \quad (7)$$

В правой части стоит искомый вектор x_{k+1} сложенный с ошибками $\Phi \Delta x_k$, ξ_{ϕ_k} . Обозначим матрицу ковариации этих ошибок через M

$$M_{k+1} = E(\Phi_k \Delta x_k + \xi_k)(\Delta x_k^T \Phi_k^T + \xi_k^T), \quad M_{k+1} = E(\Phi_k \Delta x_k \Delta x_k^T \Phi_k^T + \xi_k \Delta x_k^T \Phi_k^T + \xi_k^T \Phi_k \Delta x_k + \xi_k \xi_k^T).$$

Ввиду некоррелированности ошибок оценивания и ошибок модели

$$E(\xi_k \Delta x_k^T \Phi_k^T) = 0; \quad E(\xi_k^T \Phi_k \Delta x_k) = 0 \quad (8)$$

получаем, что $M_{k+1} = \Phi_k E(\Delta x_k \Delta x_k^T) \Phi_k^T + E(\xi_k \xi_k^T)$

Матрица M интерпретируется как матрица ковариации ошибок экстраполяции или матрица ковариации ошибок прогноза. После некоторых преобразований уравнений (2), (3) и с учетом (8) получаем рекуррентные соотношения для матрицы усиления K_k и ковариационной матрицы ошибок оценивания P_k

$$M_{k+1} = \Phi_k P_k \Phi_k^T + W_k. \quad (9)$$

$$K_k = M_k H_k^T (R_k + H_k M_k H_k^T)^{-1} \quad (10)$$

$$P_k = M_k - K_k H_k M_k \quad (11)$$

2.2 Целевая функция динамического ОС

Целевая функция динамического ОС выглядит следующим образом:

$$J(x) = (\bar{y} - y(x))^T R_y^{-1} (\bar{y} - y(x)) + (\bar{x} - x)^T M^{-1} (\bar{x} - x), \quad (12)$$

где $\bar{x}$ – измерения компонент вектора состояния. При отсутствии измерений модуля или фазы напряжения, в целевой функции используется оценка, полученная на предыдущем срезе. В качестве весовых коэффициентов для измерений или псевдоизмерений компонент вектора состояния используется матрица M^{-1} , обратная ковариационной матрице ошибок прогноза.

2.3 Алгоритм динамического ОС

Если динамическое оценивание состояния выполняется по первому срезу, то ковариационные матрицы P_k , W_k задаются следующим образом. Диагональным элементам ковариационной матрицы W_k присваиваются значения равные дисперсиям ошибок измерений модуля и фазы напряжения. Ковариационная матрица ошибок оценок компонент вектора состояния P_k вычисляется по (5). В качестве исходных приближений компонент вектора состояния используются измерения, при отсутствии таковых используются номинальные модули напряжения и нулевые углы.

Динамическое оценивание состояния режима по срезу k , где $k > 1$, выполняется по следующему алгоритму.

1. Считывание среза k ($\bar{y}_k, \bar{x}_k$). Задание начальных условий $\mathcal{E}_{k-1}, M_{k-1}$.
2. Задание исходных приближений компонент вектора состояния. В качестве исходных приближений используются измерения компонент вектора состояния, при отсутствии таковых берутся результаты ОС предыдущего среза ($\mathcal{E}_{k-1}$).

3. Вычисление матрицы производных $H_k^i = \frac{\partial y_k}{\partial x_k}$ в заданной точке. Вычисление $y_k^i = y(x_k)$, где i – номер итерации.
4. Вычисление ковариационной матрицы P_k^i по (10), (11).
5. Вычисление поправки к компонентам вектора состояния $\Delta x_k^i = P_k^i * M_{k-1}^{-1} * (\bar{x}_k - x_k) + P_k^i H_k^T * R_y^{-1} * (\bar{y} - y(x_k^i))$
6. Вычисление значений компонент вектора состояния.
7. Если $\Delta x_k^i < \xi$, то на п.8. Иначе 3.
8. Расчет параметров установившегося режима через вектор состояния.
9. Вычисление компонент ковариационной матрицы шума модели динамики W_k

$$\mu_{(k+1)j} = (1 - \alpha)\mu_{kj} + \alpha \Delta_{(k+1)j},$$

$$\sigma_{\phi(k+1)j}^2 = (1 - \alpha)\sigma_{\phi kj}^2 + \alpha (\Delta_{(k+1)j} - \mu_{(k+1)j})^2,$$

где $0 < \alpha < 1$ – коэффициент забывания, μ_j – математическое ожидание отклонения измерения от оценки; $\Delta_{kj} = \bar{x}_j - \hat{x}_j$ – разность между j -м измерением компоненты вектора состояния и ее оценкой для k -го среза.

10. Вычисление ковариационной матрицы ошибок прогноза M_{k+1} по (9). Матрица перехода Φ_k принимается равной единичной матрице, из-за малого времени упреждения.
11. Проверка корректности работы фильтра. Если да, то переход на п.1.
12. Конец работы алгоритма.

3 ДОСТОВЕРИЗАЦИЯ КРИТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Существуют измерения, которые при использовании данных только одного среза, остаются непроверенными, а при их отсутствии часть ЭЭС становится ненаблюдаемой. Такие измерения называются критическими. В критических измерениях грубая ошибка может быть обнаружена только при наличии статистической информации или прогноза. Динамическое оценивание состояния предоставляет оба вида информации. Для решения данной задачи составляются и анализируются следующие равенства и неравенства:

$$|\bar{y}_{i,k-1} - \bar{y}_{i,k}| \neq 0, \quad (13)$$

$$|\bar{y}_{i,k-1} - \bar{y}_{i,k}| \leq d_i, \quad (14)$$

$$|\bar{y}_{i,k} - \tilde{y}_{i,k}| \leq \tilde{d}_i, \quad (15)$$

где $d_i = 3\sigma$, $\tilde{d}_i = 3\sqrt{\sigma_{yi}^2 + \sigma_{Mi}^2}$, $\bar{y}_{i,k}$ – измерение на срезе k , $\tilde{y}_{i,k}$ – прогноз на срезе k , σ_M^2 – диагональный элемент ковариационной матрицы ошибок прогноза M .

В результате решения задачи критическое измерение объявляется достоверным, ошибочным или сомнительным. Измерение объявляется достоверным при выполнении условий (13), (14). При невыполнении условия (13) измерение объявляется ошибочным. Невыполнение неравенства (14) и выполнение неравенства (15) говорит о возможном изменении режима, и данное измерение объявляется сомнительным. На следующем цикле работы динамического оценивания состояния сомнительное измерение становится достоверным или ошибочным.

4 ФИЛЬТРАЦИЯ СЛУЧАЙНЫХ ОШИБОК В ИЗМЕРЕНИЯХ

Фильтрация случайных ошибок в измерениях необходима при выполнении следующего условия:

$$\xi_{\text{фил}} < \xi_{(k)H} \quad , \quad (16)$$

$\xi_{(k)H} = (1 - \alpha)\xi_{(k-1)H} + \alpha \bar{y}_{(k)}$ – отклонение измерения от среднего значения на срезе k ,

$\xi_{\text{фил}} = \frac{1}{k1} \sum_{i=1}^{k1} \mathfrak{E}_i - y_{cp}$ – отклонение полученной оценки от среднего значения оценки за $k1$ срезов.

При выполнении условия (16) оценивание данной компоненты вектора состояния не выполняется, и матрица производных уменьшается на N_m , где N_m – количество точных компонент вектора состояния. Качество оценивания определяется по формуле

$$\Phi_k = \sum_{i=1}^m \frac{(\bar{y}_i - y_i(\mathfrak{E}))^2}{\sigma_i^2}.$$

5 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Настроенный фильтр Калмана позволяет выполнять краткосрочное прогнозирование вектора состояния. По известному вектору состояния могут быть вычислены все параметры режима. Прогнозирование компонент вектора состояния выполняется с помощью динамического ОС при условии, что дисперсии ошибок измерений равны бесконечности.

Значения прогнозов всех компонент вектора состояния вычисляется по формуле

$$\tilde{x}_{k+1} = \bar{x}_k + P_k * M_k^{-1} * \Delta \tilde{x}_k.$$

Ошибка прогнозирования на первом такте прогнозирования определяется следующим образом:

$\Delta \tilde{x}_k = \mathfrak{E}_k - \bar{x}_k$, где $\mathfrak{E}_k$ – оценки компонент вектора состояния на предыдущем срезе, $\bar{x}_k$ – измерение на предыдущем срезе. На следующих срезах ошибка прогноза вычисляется по формуле $\Delta \tilde{x}_k = \mathfrak{E}_k - \tilde{x}_k$, где $\tilde{x}_k$ – прогноз компонент вектора состояния на предыдущем срезе. Точность прогнозирования определяется по выражению:

$$\Phi_x = \frac{1}{k} \sum_1^k (|\tilde{x}| - |\mathfrak{E}|). \quad (17)$$

6 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчеты выполнялись на схеме, представляющей собой объединение пяти ЭЭС (рис. 1).

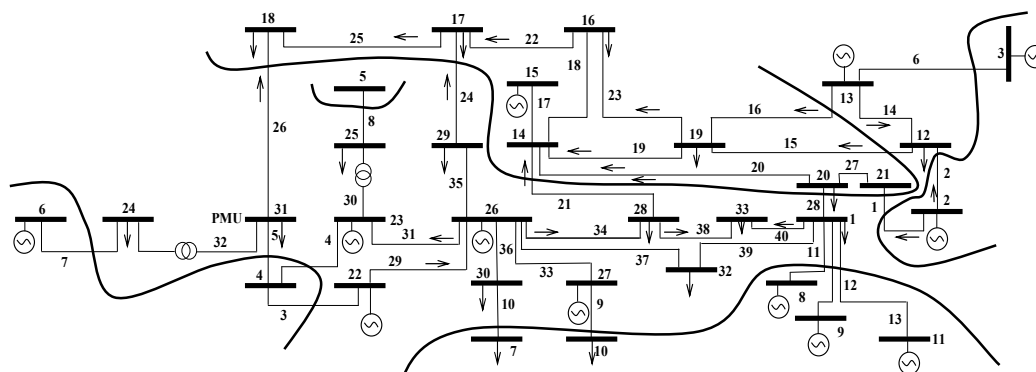


Рис.1. Тестовая схема

Схема состоит из 33 узлов, 40 связей, нескольких замкнутых контуров, двух трансформаторов. В схеме имеется 13 межсистемных связей. В диспетчерский пункт поступает 100 измерений.

6.1 Формирование базы данных

Для решения поставленных задач создается виртуальная база данных срезов измерений. База данных формируется в имитационном эксперименте на основе графика активной и реактивной нагрузки в узле 31. Каждый срез создается следующим образом: при определенном значении нагрузки считается установившийся режим. Затем на измеряемые параметры установившегося режима $y_{i(yp)}$ накладываются ошибки, сгенерированные датчиком случайных чисел и вычисляется новое значение измерения по формуле

$$y_i = y_{i(yp)} + x_{случ} \sqrt{\sigma_{i(y)}^2},$$

где $x_{случ} \rightarrow N(0,1)$. Вычисленные значения измерений называются срезом и являются исходной информацией при решении задачи динамического оценивания состояния.

6.2 Задача 1. Обнаружение грубых ошибок в измерениях (достоверизация измерений)

Измерения модуля напряжения в одном из узлов схемы на срезах $k=1-4$ равны $\bar{U}_1 = 338.5кВ$, $\bar{U}_2 = 337кВ$, $\bar{U}_3 = 344кВ$, $\bar{U}_4 = 341кВ$. Дисперсия измерения равна $\sigma^2 = 1.5кВ^2$, $d = 3\sqrt{1.5} = 3.6$. Прогноз модуля напряжения на один срез вперед равен $\tilde{U}_2 = 340кВ$, $\tilde{U}_3 = 338кВ$, $\tilde{U}_4 = 340кВ$, $\tilde{d}_i = 3\sqrt{(1.5+1)^2} = 4.7$. На каждом срезе выполняется достоверизация этого измерения с целью выявления в нем грубой ошибки. Значения измерений и прогноза подставляются в (13), (14), (15) и проверяется выполнение этих условий. Результаты проверки условий (13), (14), (15) для исследуемого измерения на срезах $k=2,3,4$ показаны в табл. 1

№ среза	Условие	Численное значение	Результат	Вывод
2	$ \bar{y}_1 - \bar{y}_2 \neq 0$	$ 338,5 - 337 \neq 0$	выполняется	измерение достоверное
	$ \bar{y}_1 - \bar{y}_2 \leq d_i$	$ 338,5 - 337 \leq 3.6$	выполняется	
	$ \bar{y}_2 - \tilde{y}_2 \leq \tilde{d}_i$	$ 337 - 340 \leq 4.7$	выполняется	
3	$ \bar{y}_2 - \bar{y}_3 \neq 0$	$ 337 - 344 \neq 0$	выполняется	измерение сомнительное
	$ \bar{y}_2 - \bar{y}_3 \leq d_i$	$ 337 - 344 \leq 3.6$	нет	
	$ \bar{y}_3 - \tilde{y}_3 \leq \tilde{d}_i$	$ 337 - 338 \leq 4.7$	выполняется	
4	$ \bar{y}_3 - \bar{y}_4 \neq 0$	$ 344 - 341 \neq 0$	выполняется	измерение достоверное
	$ \bar{y}_3 - \bar{y}_4 \leq d_i$	$ 344 - 341 \leq 3.6$	выполняется	
	$ \bar{y}_4 - \tilde{y}_4 \leq \tilde{d}_i$	$ 341 - 340 \leq 4.7$	выполняется	

Табл. 1. Результат достоверизации измерения на трех срезах

6.3 Задача 2. Фильтрация случайных ошибок

На рис. 2 показаны кривые оценок (кривая 1), измерений (кривая 2) и эталона (кривая 3) модуля и фазы напряжения за 50 срезов в узле 31. По горизонтали показаны номера срезов.

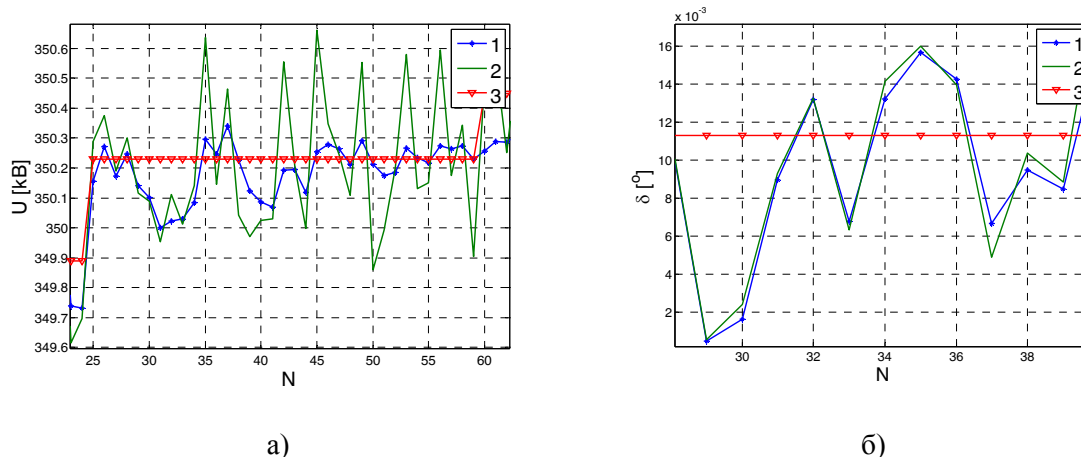


Рис.2. Оценки, измерения, эталон модуля и фазы напряжения в узле 31

Из рис. 2а видно, что фильтрация улучшает качество измерений модуля напряжения. Из рис. 2б видно, что оценки фазы напряжения близки к измерениям. Это означает, что нет необходимости оценивать эту компоненту.

6.4 Задача 3. Прогнозирование компонент вектора состояния

На рис. 3 показаны кривые оценок (1), измерений (2), эталона (3), прогноза (4) за несколько срезов.

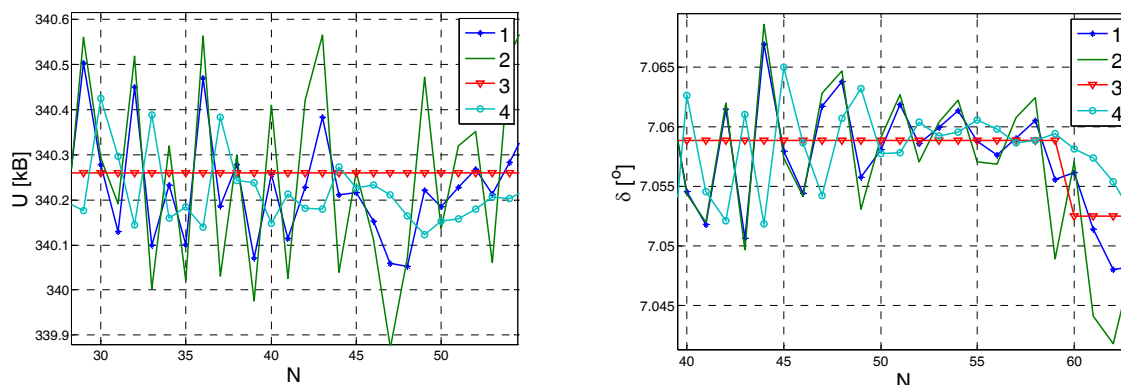


Рис.3. Оценки, измерения, эталон, прогноз модуля и фазы напряжения в узле 31

В табл. 2 показаны средняя ошибка прогнозирования модуля и фазы напряжения за 80 срезов, вычисленная по (17).

Компонента	Средняя ошибка прогноза	
U	1.3 kV	0.4 %
δ	0.0069°	0.085 %

Табл. 2. Средняя ошибка прогноза компонент вектора состояния

Из рис.3 и табл.2 видно, что прогноз выполняется с высокой точностью, т.к. средняя ошибка прогноза не превышает точности измерений. Модуль напряжения измеряется с точностью $\pm 0.75\text{kV}$. Фаза напряжения измеряется с точностью $\pm 0.017^\circ$.

7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В работе показано, что с помощью динамического оценивания состояния
- грубые ошибки в критических измерениях могут быть обнаружены. Для этого составляются и анализируются равенства и неравенства, в которые входят измерения и значения прогнозов;
 - выявляются точно измеренные компоненты вектора состояния. Исключение этих компонент из матрицы производных приводит к уменьшению размерности задачи оценивания состояния, что ускоряет процесс получения оцененного режима;
 - выполняется краткосрочное прогнозирование компонент вектора состояния. Точность прогнозирования соизмерима со значением точности, с которой измеряются параметры режима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Phadke A.G. Synchronized Phasor Measurements. A Historical Overview. – IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, 2002, vol. 1, pp. 476-479.
- [2]. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. – М.: Наука, 1976. – 220 с.
- [3]. M.B. Do Coutto Filho, J.C. Stacchini de Souza, R.S. Freund, “Forecasting-aided state estimation – Part 2: Implementation”, IEEE Trans. Power Syst., vol.24, no.4, pp.1678-1685, Nov.2009.
- [4]. A.M. Leite da Silva, M.B., Do Couto Filho, and J.M.C. Cantera, “ An efficient dynamic state estimation including bad data processing”, IEEE Trans. Power Syst., vol.2, no.4, pp. 1050-1058, Nov.1987.
- [5]. К. Брамер, Г. Зиффлинг. Фильтр Калмана–Бьюси. М.: Наука, 1982. – 198с.