

# Прогнозирование параметров режима при мониторинге и управлении электроэнергетической системой

КОЛОСОК И.Н., ГУРИНА Л.А.

*Рассмотрены вопросы классификации и моделирования информационных потоков, используемых при мониторинге режимов электроэнергетической системы (ЭЭС) по данным традиционных измерений SCADA и синхронизированных векторных измерений (СВИ). Под критерием качества измерительной информации понимается ее достаточность и достоверность, определяемая на основе методов анализа измерений при оценивании состояния ЭЭС. Предложены подходы к выбору математических моделей измерений для решения задач оценивания состояния ЭЭС и прогнозирования режимных параметров, а также моделей прогнозирования в зависимости от качества поступившей информации. При разработке методики прогнозирования использовались методы динамического оценивания состояния, а также регрессионные модели с нечеткими коэффициентами и модели, построенные на сочетании теории случайных процессов и нечетких множеств. Представлены результаты прогнозирования вероятностных характеристик потоков активной мощности при неполном достоверном информационном потоке на основе реальных данных.*

**Ключевые слова:** энергосистема, измерения SCADA, векторные измерения, модели измерений, оценивание состояния, прогнозирование

Современные условия функционирования ЭЭС и создание интеллектуальной энергетической системы вызывают необходимость применения новых технологий и средств генерации, передачи и потребления электроэнергии, способов получения, передачи, обработки и представления информации. В соответствии с этим требуют своего развития и системы управления режимами ЭЭС на основе моделирования поведения энергосистемы в различ-

*Matters concerned with classification and modeling of information flows used in monitoring the operating conditions of an electric power system (EPS) based on the data of traditional SCADA-measurements and synchronized vector measurements are considered. The measured information quality criterion is understood to mean sufficiency and validity of this information, which is determined using the measurement analysis methods in estimating the state of an EPS. Approaches to selecting the mathematical models of measurements for solving the EPS state estimation problems and predicting the operating parameters, as well as to selecting the prediction models depending on the quality of arrived information are proposed. The prediction procedure was developed using the dynamic state estimation methods, as well as regression models with fuzzy coefficients and models constructed with combined use of the theory of random processes and fuzzy sets. Results from prediction of the probabilistic characteristics of active power flows under the conditions of incomplete valid information flow based on real data are presented.*

**Key words:** power system, SCADA-measurements, vector measurements, measurement models, state estimation, prediction

ных режимных ситуациях, разработки быстродействующих программных средств расчета текущего режима (оценивание состояния) ЭЭС, прогнозирования режимных параметров. При этом информационное обеспечение систем управления должно обеспечивать контроль параметров в режиме on-line. Для достижения этого крайне важным является использование режимной информации требуемого качества и необходимого объема.

---

**Войтов Олег Николаевич** окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1971 г. В 1992 г. защитил кандидатскую диссертацию «Алгоритмы управления режимами электроэнергетической системы» в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН). Ведущий научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

**Голуб Ирина Ивановна** окончила ЭЭФ МЭИ в 1971 г. В 1994 г. защитила докторскую диссертацию

«Анализ и синтез наблюдаемости электроэнергетической системы» в ИСЭМ СО РАН. Ведущий научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.

**Манусов Вадим Зиновьевич** окончил Новосибирский электротехнический институт в 1963 г. В 1985 г. защитил докторскую диссертацию «Нелинейные стохастические модели для анализа и планирования режимов электрических систем». Профессор кафедры «Системы электроснабжения» Новосибирского государственного технического университета.

Анализ временной последовательности отдельных этапов мониторинга и прогнозирования режимов ЭЭС и управления ими [1] подтверждает необходимость решения задачи прогнозирования параметров предстоящего режима, поскольку оценивание состояния (ОС) дает текущую оценку режима с определенным запаздыванием, а для задач мониторинга и управления требуется некоторое упреждение оценки состояния системы. Кроме того, из-за недостаточного объема телеизмерений современные расчетные схемы являются, как правило, частично ненаблюдаемыми, т.е. содержат наряду с наблюдаемыми районами ненаблюдаемые фрагменты. При ОС таких схем чаще всего в дополнение к реальным телеизмерениям (ТИ) используются псевдоизмерения узловых нагрузок в ненаблюдаемых узлах. Это могут быть нагрузки из базового режима, например из результатов обработки контрольного замера, данные суточной ведомости, прогнозы и др. Многочисленные исследования показывают, что наиболее точные результаты дает применение в качестве псевдоизмерений прогнозов узловых нагрузок. Традиционный подход к оцениванию состояния электрического режима может быть расширен путем дополнительной периодической оценки параметров схем замещения на базе текущих векторных измерений.

Отсюда вопросы совершенствования математического аппарата обработки и моделирования потоков данных, развитие методов прогнозирования параметров режима и прогнозного потокораспределения, расчета допустимых перетоков в реальном времени при управлении ЭЭС становятся все более актуальными.

В статье рассматриваются новые подходы к выбору математических моделей информационных потоков для решения задач оценивания состояния ЭЭС и прогнозирования режимных параметров на основе традиционных измерений SCADA и синхронизированных векторных измерений (СВИ) в зависимости от степени полноты и достоверности полученной измерительной информации.

**Системы сбора и обработки данных при управлении режимами ЭЭС.** Управление ЭЭС осуществляется на основе телеизмерений переменных режима и телесигналов о состоянии коммутационного оборудования системы SCADA/EMS/DMS и данных системы мониторинга переходных режимов (СМНР).

При использовании измерений SCADA/EMS/DMS проводятся анализ и управление режимом в реальном времени, планирование режима вне реального времени, формирование моделей электрической сети, оценивание состояния, расчет топологии сети, мониторинг временных элементов сети, краткосрочный прогноз нагрузки и т.д.

Система мониторинга состоит из устройств синхронизированных векторных измерений (устройство СВИ – российский аналог PMU) комплексных значений токов и напряжений элементов сети, распределенных по объектам энергосистемы (подстанции, крупные узлы) и связанных Internet-каналами передачи данных с пунктами сбора информации – Phasor Data Concentrator (PDC), в свою очередь передающих ее в центр управления ЭЭС. Самым важным из приложений СМНР является мониторинг состояния (режима) ЭЭС, открывающий новые возможности при управлении ЭЭС, в частности, в тех областях, которые функционируют под разными SCADA\EMS-системами внутри взаимодействующих ЭЭС [2].

К сожалению, в настоящее время внедрение подсистем EMS, DMS, использующих реальные данные режимов энергосистем в режиме on-line, до сих пор полностью не реализовано [3]. Это касается и задачи обработки данных, принятых в реальном времени и заархивированных для последующего использования в задачах анализа, прогнозирования и планирования. В первую очередь это связано с недостаточным объемом и низким качеством телеизмерений SCADA.

Режим ЭЭС определяется значениями активных и реактивных мощностей станций и нагрузок потребителей в узлах, перетоками активной и реактивной мощности по линиям электропередачи и другим элементам системы, токами в них, напряжениями в узлах, изменяемыми в процессе управления ЭЭС. Совокупность этих параметров режима, изменяющихся во времени, будем называть информационным потоком и обозначать вектором.

Низкое качество информационных потоков, получаемых от SCADA, обусловлено наличием в них грубых ошибок, невозможностью точной синхронизации измерений, существенной задержкой передачи данных, отказами телеметрии, существованием ненаблюдаемых районов контролируемой сети.

СМНР позволяет синхронизированно измерять комплексы токов и напряжений с высокой точностью. Тем не менее, исследования и опыт эксплуатации устройств СВИ свидетельствуют о том, что могут произойти сбои в их работе и появиться грубые ошибки в показаниях. Причинами этого являются низкий класс точности измерительных трансформаторов тока и напряжения, соединенных с входами устройств СВИ; сбои в работе коммуникационных линий (задержки передачи информации, непринятие пакетов данных в коммуникационном центре PDC); использование устройств СВИ различных производителей; ошибки в подключении фаз к четко определенным входам устройств СВИ [4–7].

Отсюда важным становится формирование информационного потока о параметрах режима с учетом его достоверности, обеспечивающего точность решения задач управления режимами ИЭС, на основе:

- телеизмерений SCADA/EMS/DMS;
- данных СМПР;
- совокупности измерений SCADA и СМПР.

Вектор SCADA-измерений имеет вид  $Z_1 = \{P_i, Q_i, P_{ij}, Q_{ij}, U_i, I_i, I_{ij}\}$ , где  $P_i, Q_i$  – активная и реактивная мощности узлов;  $P_{ij}, Q_{ij}$  – активные и реактивные перетоки мощностей в линиях;  $U_i$  – модули узловых напряжений;  $I_i, I_{ij}$  – модули токов в узлах и линиях.

Поток  $Z_2$  составляют СВИ и вычисленные по ним активные и реактивные перетоки мощностей в линиях  $P_{ij}, Q_{ij}$ :  $Z_2 = \{U_i, d_i, I_{ij}, P_{ij}, Q_{ij}\}$ , где  $U_i, d_i$  – модуль и фаза напряжения  $i$ -го узла;  $I_{ij}$  – модуль тока в ветви, смежной узлу  $i$ ;  $j_{ij}$  – угол между током в этой ветви и напряжением в узле  $i$ .

При совместном использовании телеизмерений SCADA и данных СМПР (поток  $Z_3$ ) возможны следующие способы задания потока измерений  $Z_2$  дополнительно к телеизмерениям SCADA:

измерения модулей и фаз напряжений в узлах установки устройств СВИ;

модули и фазы напряжений в узлах установки СВИ и вычисленные по измерениям комплексов токов ПИ модулей и фазы напряжений в смежных узлах;

ПИ перетоков мощностей, вычисленные на основе СВИ [4].

Каждый вариант имеет свои достоинства и недостатки, выбор того или иного из них определяется особенностями расчетной схемы, числом и размещением измерений, применяемых для задач управления режимами ЭЭС. Так, использование устройств СВИ позволяет повысить точность измерительной информации, обеспечить наблюдаемость более полной расчетной схемы, повысить эффективность методов обнаружения грубых ошибок в измерительной информации и точность получаемых оценок. В сочетании с телеизмерениями SCADA СВИ более полно отражают режим рабочей схемы ЭЭС. Вместе с тем, появление грубых ошибок в измерениях модулей и фаз напряжений при невозможности проведения их априорной достоверизации может привести к тяжелым последствиям, поскольку искажаются оценки большого числа измеренных и неизмеренных переменных режима и ухудшается сходимость вычислительного процесса вплоть до расходимости [8]. При наличии грубых ошибок в измерениях SCADA и СВИ невозможно проведение их совместной достоверизации из-за большого различия их точности (дисперсий) [4]. Кроме того, для совместного использования изме-

рений SCADA и СВИ необходима синхронизация данных.

**Классификация измерений SCADA и СМПР.** Развитие информационных технологий и математических методов анализа и обработки данных измерительных устройств предполагает повышение качества информационных потоков при управлении режимами ЭЭС. Для различных задач АСДУ ЭЭС одна и та же используемая информация в одном случае может быть достаточной, в другом неполной, а в третьем и вовсе неполной и недостоверной. Примером может послужить задача прогнозирования параметров режима на различные интервалы упреждения. Так, при краткосрочном и особенно оперативном, прогнозировании требования к качеству информации повышаются в связи с ограниченностью по времени исправления принимаемых решений. Таким образом, при решении задач управления в зависимости от рассматриваемого периода времени информационные потоки обладают различной мерой неопределенности (энтропией) и имеют нечеткий характер. Поэтому критерий качества информации, характеризующий достаточность и достоверность информационных потоков, может быть определен на основе вероятностного подхода и теории нечетких множеств [9].

Исходя из приведенного, режимная информация может быть:

- неполной ( $A_1$ );
- полной ( $A_2$ );
- недостоверной ( $A_3$ );
- достоверной ( $A_4$ ).

Степень полноты и достоверности информации определяется пересечением указанных групп. Мера полноты (достоверности) заключена в сегменте  $[0;1]$ , где левая граница определяет отсутствие информации (недостоверность), а правая – полный объем информации или ее избыточность (достоверность). Пересечение  $[0;1] \cap [0;1]$  образует  $\mathbf{B}$  – матрицу, описывающую свойства информационных потоков:

$$\mathbf{B} = \begin{matrix} \textcircled{00} & \textcircled{01} \\ \textcircled{10} & \textcircled{11} \end{matrix}$$

где 00 – неполный недостоверный поток; 01 – неполный достоверный поток; 10 – полный недостоверный поток; 11 – полный достоверный поток.

Операции, проводимые со значениями измерений четырех множеств, могут выполняться как в булевом пространстве, так и в векторном, а в пересекающихся областях только в векторном пространстве, т.е. необходимо оперировать не с отдельными значениями при отображении информации, а с их функциями принадлежности к конкретному множеству  $m_{A_k}$ .

Возможны  $N$  вариантов  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$  полноты и достоверности информации, с которыми связаны вероятности  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_N$ . Энтропия определяется как

$$H(p_1, p_2, \dots, p_N) = - \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i, \quad (1)$$

где  $H_{\min} = 0, H_{\max} = 1$ .

Данная функция позволяет описать пороговый уровень  $a$ , под которым понимаются достаточные объем и точность информации для решения поставленной задачи. Функции принадлежности измерений к перечисленным группам –  $m_{A_{III}}^{\sim}, m_{A_{IV}}^{\sim}, m_{A_I \cap \tilde{A}_J}^{\sim}(A_{i,j}) = \min[m_{A_I}^{\sim}(A_I), m_{A_J}^{\sim}(A_J)]$ , при этом

$$P_i = \frac{m_{A_i}^{\sim}(A_i)}{\sum_{i=1}^N m_{A_i}^{\sim}(A_i)}. \quad (2)$$

После ряда преобразований (1) с учетом (2) получено выражение для определения порогового уровня:

$$a = \frac{1}{\ln N \sum_{i=1}^N m_{A_i}^{\sim}(A_i)}$$

$$\sum_{i=1}^N m_{A_i}^{\sim}(A_i) \ln \sum_{i=1}^N m_{A_i}^{\sim}(A_i) - \sum_{i=1}^N m_{A_i}^{\sim}(A_i) \ln m_{A_i}^{\sim}(A_i) \quad (3)$$

Множество значений параметров режима  $a$ -уровня представляется совокупностью

$$\tilde{A}_a = \{ \tilde{A}_i / \hat{A}_i \mid A, m_{A_i}^{\sim}(A_i) \geq a \},$$

где  $\tilde{A} \in A, \hat{A}_i \in A, a \in [0,1]$ .

Выбирается множество значений параметров режима с наибольшим  $a$ -уровнем.

В качестве примера определения требуемого объема измерений при прогнозировании интегральных характеристик и показателей графика электрической нагрузки рассмотрим суточный пик активной мощности с разным интервалом дискретизации по времени:  $Dt_1 = 10$  мин,  $Dt_2 = 30$  мин,  $Dt_3 = 60$  мин. По (3) находятся значения порогового уровня:

$$a_{Dt_1} = 0,822935, a_{Dt_2} = 0,825626, a_{Dt_3} = 0,807833.$$

При решении задачи прогнозирования соответственно было выбрано множество с максимальным значением порогового уровня  $a_{Dt_2}$ , содержащее 48 значений активной мощности  $P_{ср}$  и  $P_{оф}$ , и спрогно-

зированы среднее и эффективное значения активной мощности, коэффициент формы графика  $k_{ф}$ . Ошибка прогноза составила не более 1,2%.

**Модели измерений при ОС ЭЭС и прогнозирования параметров режима.** Для эффективного решения задач оперативного управления режимами ЭЭС нужна своевременная, достоверная текущая и прогнозируемая на различные интервалы времени информация о параметрах режима. Основные проблемы, возникающие при решении задач ОС и прогнозирования, связаны с низким качеством измерительной информации, неудовлетворением требованиями, предъявляемым к математическим моделям параметров режима и прогнозирования, например таким, как адекватность, достоверность, рекуррентность, гибкость. Так, гибкость модели прогнозирования заключается в ее адаптации к любому качеству исходной информации.

Несмотря на то что задачей ОС, целью которой является фильтрация погрешностей измерений, занимаются уже много лет, свойства реальных ошибок измерений исследованы совершенно недостаточно, что можно объяснить трудоемкостью исследования этой проблемы, связанной с большим разнообразием средств измерений, систем сбора и передачи и преобразования данных, вносящих свои помехи, сложностью метрологического обследования измерительного оборудования, в частности трансформаторов тока и напряжения.

В ИСЭМ СО РАН для решения задачи ОС разработан метод контрольных уравнений (КУ), позволяющий в определенной мере преодолеть трудности, связанные с отсутствием информации о вероятностных характеристиках ошибок измерений (их математических ожиданий, дисперсий и др.) и идентифицировать соответствующие параметры распределений на основе полученных КУ.

Контрольные уравнения – это уравнения установившегося режима, в которые входят только измеренные параметры режима [10]. Они могут быть получены из уравнений установившегося режима исключением из них неизмеренных переменных. Эти КУ позволяют до решения задачи ОС выполнять проверку достоверности измерений, т.е. выявлять в них грубые ошибки, а при циклической обработке данных идентифицировать дисперсии измерений.

*Метод контрольных уравнений для априорной проверки достоверности измерений.* Основная идея алгоритма обнаружения плохих данных на основе КУ состоит в сопоставлении значения невязки КУ  $w_k$ , вычисленного после подстановки в него полученных измерений, с некоторым порогом  $d_k$ . Для этого проверяется условие  $|w_k| < d_k$  [10].

Невязка линейризованного КУ является алгебраической суммой погрешностей измерений, имеющих нормальное распределение. Поэтому она также имеет нормальное распределение  $w_k \in N(0, s_{w_k}^2)$  с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, определяемой дисперсиями входящих в данное КУ измерений. Зная дисперсию невязки КУ и задаваясь вероятностью пропуска ошибки в задачу ОС  $a$ , нетрудно определить порог  $d_k = g_a s_{w_k}$ , где  $g_a$  – квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности  $a$ .

Если условие  $|w_k| < d_k$  выполняется, то все измерения, входящие в данное КУ, считаются достоверными. В противном случае КУ содержит измерения с грубой ошибкой, для поиска которых применяются различные алгоритмы идентификации плохих данных [10].

В результате применения этих алгоритмов все измерения делятся на четыре группы:

- 1) достоверные;
- 2) ошибочные, измеренные значения которых могут быть заменены на вычисленные;
- 3) сомнительные – это группы измерения, в которых можно обнаружить факт присутствия грубой ошибки, но однозначно идентифицировать ошибочное измерение нельзя; такие измерения образуют критическую группу (КГ); при выпадении хотя бы одного измерения из КГ остальные становятся непроверяемыми или критическими;
- 4) непроверенные – измерения, не вошедшие в КУ, ошибки в них обнаружить нельзя; такие измерения называются критическими.

При низкой избыточности информации количество критических измерений оказывается большим, а наличие критических групп увеличивает вероятность роста числа непроверяемых измерений. Для достоверизации критических измерений и измерений, входящих в критические группы, предлагается использовать динамические подходы [10], а также оснащать районы с низкой избыточностью измерений устройствами СВИ.

В зависимости от качества информационных потоков предлагается использование следующих моделей параметров режима.

1. Полный достоверный поток. Вектор измеренных значений параметров режима представляется моделью

$$y = y_{\text{ист}} + x_y, \quad (4)$$

где  $y_{\text{ист}}$  – вектор истинных значений измеряемых переменных режима ЭЭС;  $x_y$  – вектор случайных ошибок.

2. Полный недостоверный поток. Недостоверный поток характеризуется появлением в

измерениях грубых ошибок наряду со случайными ошибками:

$$y = y_{\text{ист}} + x_y + b, \quad (5)$$

где  $b$  – вектор грубых ошибок, заметно превышающих  $x_y$ .

При наличии сомнительных данных для получения ПИ появляется необходимость прогнозирования параметров режима. В этом случае прогнозную модель предлагается описывать в виде регрессионной модели с нечеткими коэффициентами  $\tilde{a}_i$  [11]:

$$\tilde{P}(t+t) = \prod_{i=0}^n \tilde{a}_i(t) t^i, \quad (6)$$

где  $t$  – интервал упреждения.

Оценка полученного прогноза проводится расчетом расстояния Хемминга с использованием метода экспоненциального сглаживания:

$$d(P(t), P(t+t)) = \sum_{i=1, n} \dot{a} [m_{P(t)}(\tilde{P}_i(t)) - m_{P(t+t)}(\tilde{P}_i(t+t))] e^{-a(T-t)} \otimes \min, \quad (7)$$

где  $a$  – весовой коэффициент, значение которого уменьшается по экспоненте по мере удаления от текущего момента;  $t$  – время упреждения;  $t=0$  – начало рассматриваемой выборки;  $T$  – конец выборки, соответствующий текущему моменту выборки; экспоненциальное сглаживание позволяет корректировать прогнозируемую модель по мере выявления расхождения между прогнозами и реальными значениями параметров.

3. Неполный достоверный поток. При недостаточном объеме информационной базы о параметрах режима при решении задачи прогнозирования на основе данных SCADA целесообразно использование модели, разработанной на основе (5):

$$y(t) = \overline{y(t)} + sG(t), \quad (8)$$

где  $\overline{y(t)}$  – математическое ожидание;  $s$  – среднее квадратическое отклонение;  $G(t)$  – стандартный гауссовский процесс.

Если измерения носят достоверный характер, то достаточно прогнозирования таких параметров режима, как активная и реактивная составляющие мощности.

4. Неполный недостоверный поток. В условиях «зашумления» и неполноты данных, поступающих от систем SCADA и СМПП, случайные процессы изменения параметров режима предлагается рассматривать как фрактальные кривые и описывать следующей моделью:

$$Y(t) = Y_{\text{уст}}(t) + x(t) + h(t), \quad (9)$$

где  $Y_{\text{уст}}(t)$  – поток измерений при установившемся режиме функционирования электроэнергетической

системы;  $x(t)$  – помехи, возникающие при измерении, передаче и квантовании информации;  $h(t)$  – шум, вызванный низкочастотными или высокочастотными колебаниями в ЭЭС.

Случайная составляющая модели (9)  $x(t) = sG(t)$ , где  $s$  – среднее квадратическое отклонение измерений параметра режима;  $G(t)$  – стандартный гауссовский процесс с нулевым ожиданием и единичной дисперсией.

По фрагменту фрактальной кривой можно воспроизвести целое путем статистически подобных повторений на разных масштабах. При обработке измерений предлагается использовать пакетный вейвлет-анализ, при котором раскладываются детализирующие коэффициенты, что увеличивает информативность зашумленной информации и позволяет ее достоверизировать с учетом большой доли случайной составляющей погрешности.

Математические модели параметров режима, которые могут быть использованы при управлении ЭЭС, представлены в таблице.

При большой потере информации для задач управления режимами необходимо прогнозирование случайного процесса изменения напряжения, позволяющего рассчитать остальные параметры режима. Здесь полезно использование модели (8).

Для уменьшения погрешности расчетов, учета фактора неопределенности, различной полноты и достоверности информационных потоков при прогнозировании параметров режима предлагается следующий подход, основанный на сочетании двух теорий – случайных процессов и нечетких множеств:

в зависимости от степени достоверности и полноты информации выбирается математическая модель прогнозирования;

рассматриваются ретроспективные и текущие измерения параметров режима;

проводится их корреляционный анализ;

при прогнозировании вероятностных характеристик прогнозируемого множества измерений для ретроспективного и текущего множеств строится функция принадлежности и рассчитывается расстояние Хемминга; в зависимости от значений этого расстояния прогнозное множество заполняется значениями либо текущей, либо ретроспективной совокупностью значений;

оценка полученного прогноза проводится согласно (7).

**Пример.** Решалась задача прогнозирования вероятностных характеристик перетоков активной мощности при неполном достоверном информационном потоке при использовании модели (8). Рассматривались реализации случайного процесса изменения активной мощности – ретроспективное множество значений  $\tilde{P}_p(t)$  (рис. 1,а), текущее множество значений  $\tilde{P}_m(t)$  (рис. 1,б), прогнозируемое множество значений  $\tilde{P}_{пр}(t)$ . Для первых двух найдены математические ожидания и корреляционные функции  $K_p(t)$  и  $K_m(t)$ .

Для определения корреляционной функции  $K_{пр}(t)$  прогнозируемого перетока мощности при различных законах распределения строятся функции принадлежности  $K_p(t)$ ,  $K_m(t)$  на интервалах дискретизации. Из выражения

$$d(K_p(t), K_m(t)) = \max(\inf(K_p(t)), \inf(K_m(t))) - \min(\sup(K_p(t)), \sup(K_m(t)))$$

находятся значения прогнозируемой функции  $K_{пр}(t)$ . Для нахождения математического ожида-

Характеристика информационного потока	Модель измерений SCADA и СВИ	Проверка		Причины, обуславливающие прогнозирование параметров режима	Модель прогнозирования
		полноты	достоверности		
Полный достоверный	$y = y_{ист} + x_y$	Схема наблюдаема	Для всех КУ $ w_k  < d_k$	Критические измерения, которые не входят в КУ	Динамическое ОС [10]
Полный недостоверный	$y = y_{ист} + x_y + b$	Схема наблюдаема	Есть КУ с $ w_k  > d_k$	Критические измерения Группы сомнительных данных	Динамическое ОС; регрессионная модель с нечеткими коэффициентами (6)
Неполный достоверный	В наблюдаемых узлах: $y = y_{ист} + x_y$	Схема не полностью наблюдаема	Для всех КУ $ w_k  < d_k$	Критические измерения	Динамическое ОС; регрессионная модель с нечеткими коэффициентами (6); модель (8) в ненаблюдаемых узлах
Неполный недостоверный	В наблюдаемых узлах: $y = y_{ист} + x_y + b$	Схема не полностью наблюдаема	Есть КУ с $ w_k  > d_k$	Критические измерения и группы	Динамическое ОС; модель (9) в ненаблюдаемых узлах

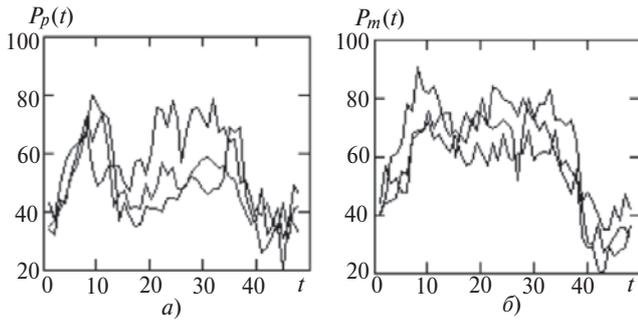


Рис. 1. Случайные процессы изменения активной мощности  $P_p(t)$  и  $P_m(t)$

ния  $M(\tilde{P}_{\text{пр}}(t))$  прогнозируемого перетока мощности анализируются функции принадлежности математических ожиданий ретроспективного и текущего множеств согласно

$$d(M_p(t), M_m(t)) = \max(\mu(M_p(t)), \mu(M_m(t))) - \min(\mu(M_p(t)), \mu(M_m(t))).$$

Определяется среднее квадратическое отклонение  $s(\tilde{P}_{\text{пр}}(t))$  прогнозируемого множества.

С помощью генератора случайных чисел сгенерирован стандартный гауссовский процесс с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией и согласно (8) найдены значения прогнозируемой мощности (рис. 2).

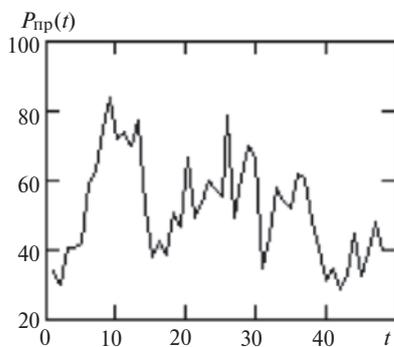


Рис. 2. График прогнозируемого случайного процесса изменения активной мощности

При этом ошибка прогноза интегральных показателей и вероятностных характеристик перетока активной мощности не превысила 1%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропай Н.И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы. — Автоматизация и ИТ в энергетике, 2011, № 3, с. 11–15.
2. Аюев Б.И., Жуков А.В. Новые подходы к мониторингу запаса устойчивости электроэнергетических систем. — Сб. докладов III Международ. научно-практической конф. «Энергосистема: управление, конкуренция, образование». — Екатеринбург: УГТУ, 2008, т. 1, с. 5–11.
3. Нестеренко В.Л., Карасев Ю.Д. Оперативно-информационные комплексы и системы технологических задач. — Энергоэксперт, 2013, № 2, с. 24–27.
4. Воропай Н.И., Голуб И.И., Колосок И.Н., Хохлов М.В. Методы оценивания состояния интеллектуальных ЭЭС. — Сб. докладов III междунар. научно-технической конф. «Электроэнергетика глазами молодежи». — Екатеринбург: УрФУ, 2012, т. 1, с. 26–37.
5. Sakis Meliopoulos A.P., Cokkinides G.J., F. Galvan, Fardanesh B. Advances in the SuperCalibrator Concept – Practical Implementations. — Proceedings of 40th Hawaii International Conference on System Science, 2007.
6. Grobovoy A., Bondareva N. Risk Assessment for SPS and WAMS Technology in the Russian Far East Power Grid. — The 3rd International Workshop «Liberalization and Modernization of Power Systems: Risk Assessment and Optimization for Asset Management», 14–18 August, 2006, Irkutsk: ESI, 2006, p. 47–53.
7. Казаков П.Н., Могилко Р.Н., Нестеров С.А. Опыт разработки и внедрения регистраторов переходных режимов SMART-WAMS. Перспективы развития SMART-WAMS в режиме on-line. — Proc. of Conf. Monitoring of Power System Dynamics Performance, 28–30 April 2008, St. Petersburg: CDRUM. № S2–1.
8. Снижение рисков каскадных аварий в электроэнергетических системах/Отв. ред. Н.И. Воропай. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011, 303 с.
9. Савина Н.В., Гурина Л.А. Выбор критерия качества отображения информации при управлении режимами. — Сб. трудов третьей Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов». — Благовещенск, 2003, т. I, с. 127–132.
10. Гамм А.З., Колосок И.Н. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах. — Новосибирск: Наука, 2000, 152 с.
11. Gurina L.A. Evaluation of Expediency of Using Fuzzy Sets Theory Simulation Informational Flows is Automated Dispatching System of Control. — Energy Cooperation in Northeast Asia: Prerequisites, Conditions, Ways (September 9-13, Irkutsk, Russia)/Edited by N.I. Voropai, D.N. Efimov. — Irkutsk: Energy Systems Institute, 2002, p. 424–426.

[28.10.13]

А в т о р ы : **Колосок Ирина Николаевна** окончила электромеханический факультет Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина в 1972 г. В 2004 г. защитила в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН докторскую диссертацию «Повышение достоверности телеизмерительной информации в ЭЭС на основе контрольных уравнений». Ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

**Гурина Людмила Александровна** окончила физико-математический факультет Благовещенского государственного педагогического университета в 1997 г. В 2004 г. в ИСЭМ СО РАН защитила кандидатскую диссертацию «Математические модели и методы представления информации для АСДУ электроэнергетическими системами в условиях неопределенности». Ведущий инженер ИСЭМ СО РАН.