

# Распределенная система мониторинга режимов электроэнергетических систем: опыт применения

БАБНИК Т., МАКХОВЕЦ Б., ПЕРКО М.

*Сбор векторных измерений по электроэнергетической системе в реальном времени в центральном узле в сочетании с комплексным анализом обеспечивают информацией WAMS (Wide Area Monitoring System), WAPS (Wide Area Protection System) и WACS (Wide Area Control Systems). Рассмотрена разработанная комплексная WAMS. Акцент ставится на архитектуре и функциональных возможностях WAMS.*

**Ключевые слова:** электроэнергетические системы, нарушения режима, системы контроля, мониторинг

Надежное и безопасное функционирование электроэнергетической системы (ЭЭС) – основное требование современного общества. Возрастающая сложность объединенных ЭЭС выдвигает серьезные требования к системам автоматического и оперативного управления для обеспечения надежного, безопасного и устойчивого функционирования больших ЭЭС.

Энергетические рынки в условиях отмены государственного регулирования в электроэнергетике обусловили возникновение предельных режимов работы ЭЭС и возросшую сложность их эксплуатации. Каскадные отключения и системные аварии приводят к серьезным нарушениям в электроснабжении. За последние 10 лет произошло несколько системных аварий в Европе, Северной и Южной Америке и Азии [1, 2].

Системные аварии могут быть вызваны:  
перегрузкой оборудования;

неустойчивостью по частоте (существенными отклонениями частоты);

неустойчивостью по напряжению (лавинной напряжению);

выходом генераторов из синхронизма;  
неадекватными действиями диспетчера;  
устойчивыми колебаниями мощности;  
каскадными отключениями.

В экономическом аспекте системную аварию можно рассматривать как стоимость:

недоставленной энергии;  
договорной неустойки;  
потерь в экономической деятельности.

Мониторинг динамики ЭЭС может предотвратить или смягчить последствия широкомасштабных возмущений. Система WAMS, основанная на изме-

*Real-time acquisition of the measured values of phasors in an electric power system at a central station and their comprehensive analysis are supported by information received from the wide-area monitoring, protection, and control systems. The integrated wide-area monitoring system developed by the authors is considered with placing emphasis on its architecture and functional abilities.*

**Key words:** electric power systems, deviations from normal operation, monitoring systems, monitoring

рений устройств PMU (Phasor Measurement Unit), осуществляет динамический мониторинг ЭЭС. Сбор векторных измерений в реальном времени по ЭЭС в центральном узле позволяет установить основные принципы WAMS, WAPS и WACS для процедур реального времени.

Традиционные системы диспетчерского управления и сбора данных SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) предоставляют устойчивую, несинхронизированную информацию о ЭЭС с разрешением по времени от 1 до 10 с. Традиционные системы ограничиваются измерениями установившихся режимов и не могут быть использованы для анализа динамики системы. Применение WAMS позволяет постоянно контролировать динамический режим системы. WAMS предоставляет синхронизированную во времени информацию каждые 20 мс (в системе с частотой 50 герц); все данные имеют метку времени. Более того, данные синхронизируются с точностью до миллисекунд.

В статье рассматривается WAMS, разработанная в Словении. Основное внимание уделяется ее архитектуре и функциональным возможностям.

**Принципиальная конфигурация WAMS** приведена на рис. 1. Ядром WAMS является сложное устройство, имеющее три основные части:

концентратор векторных данных (PDC) и их анализ в реальном времени;

архивирование данных;

визуализация данных с использованием Web SCADA.

**Функциональные возможности PDC.** Концентратор выполняет следующие функции.

1. Сбор измерений, непрерывно посылаемых PMU;  
обработка ошибок при передаче;

обеспечение функций мониторинга и управления системой в реальном времени;

хранение измерений в базе данных.

Система получает измерения с частотой выборки в зависимости от используемых PMU. Производительность сервера определяет максимальное число обслуживаемых PMU и применяемых алгоритмов.

2. *Коммуникации.* Система обеспечивает широкий диапазон протоколов обмена информацией для сбора и получения синхронизированных векторных данных. Например, PDC поддерживает стандартные протоколы обмена данными IEEE с37.118 и IEEE 1344 для соединения с PMU; PDC может получать данные по крайней мере от 100 PMU с полной разрешающей способностью 50(60) выборок в секунду.

В качестве сервера PDC поддерживает также стандартные протоколы обмена данными IEEE с37.118 и IEEE 1344. Цель соединения сервера с другими PDC – осуществлять обмен выбранными данными в реальном времени с другими компаниями, например системными операторами передающей сети.

Как сервер PDC посылает данные одновременно разным клиентам с полной разрешающей способностью 50(60) выборок в секунду. Кроме того, можно выбирать разрешающую способность пересылки данных по желанию клиента.

Кроме того, PDC может обмениваться данными с другими системами посредством стандартных

протоколов типа IEC 60870-5-101/104, DNP3 и т.д. Назначение этого соединения – посылать данные в центр управления (в системы SCADA/EMS) и получать оттуда команды.

3. *Анализ данных.* В этом разделе выполняются сложные расчеты в реальном времени, необходимые для надежного функционирования ЭЭС.

Устойчивость по напряжению рассчитывается для мониторинга передачи мощности по определенной линии электропередачи.

Устойчивость по частоте. Расчет устойчивости по частоте позволяет выявить изменения частоты в результате внезапного большого дефицита мощности или внезапной потери нагрузки.

Колебание мощности. Функция колебания мощности используется для идентификации качаний мощности на линиях. С помощью этой функции вычисляются доминирующая частота колебания, его амплитуда и коэффициент демпфирования.

Мониторинг фазового угла предполагает контроль разности фазовых углов между двумя подстанциями в сети. Эта разность возрастает с увеличением нагрузки системы. Информация о разности фазовых углов также имеет большое значение для успешной связи между двумя подстанциями. Таким образом, мониторинг фазовых углов включает:

измерение разности фазовых углов между двумя подстанциями в сети;

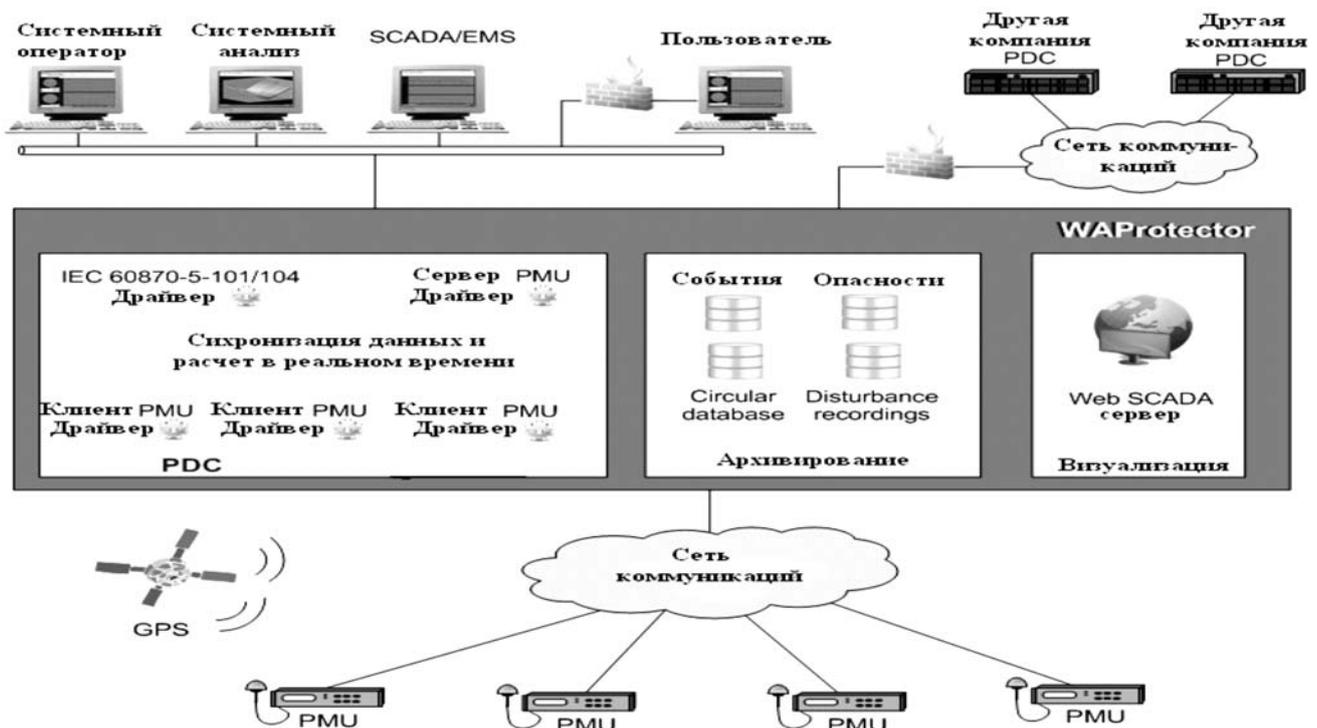


Рис. 1. Конфигурация WAMS

оценку нарушения порогового значения, которое запускает аварийную сигнализацию и предупреждает диспетчера об опасности.

Функция мониторинга для обнаружения повышения/снижения уровня. Если значение анализируемой величины больше (или меньше) порогового значения, запускается функция мониторинга для этой величины. Принцип при этом аналогичен функции мониторинга для разности фазовых углов.

Функция мониторинга для обнаружения разницы модулей. Если разница модулей между двумя величинами превышает пороговое значение, активизируется функция мониторинга для обнаружения разницы модулей. Принцип здесь тот же, что и у функции мониторинга для разности фазовых углов.

Функции, разработанные пользователем. Система состоит из программируемых логических задач с большим числом библиотек операций разного назначения, таких как арифметических, числовых, логических, арифметических с комплексными числами, сравнения и т.д. Таким образом, пользователь может создавать функциональные блоки. Примером блока, созданного пользователем, может служить схема устранения неисправности.

Мониторинг температуры проводов линий. Температура проводов является важным параметром. Она обуславливает нагрузку и провисание проводов. Превышение допустимой температуры может привести к механическому повреждению линий электропередачи.

Измерения температуры нагрева проводов можно разделить:

на косвенное измерение температуры, позволяющее определить среднюю температуру всей линии;

непосредственное измерение температуры, позволяющее точно измерять температуру линии в месте сбора данных.

Один из методов косвенного измерения температуры основан на вычислении полного сопротивления линии [3]. Если РМУ установлены на обоих концах линии, активное сопротивление линии можно определить по векторам тока и напряжения. Затем рассчитывается средняя температура по активному сопротивлению.

С учетом П-образной схемы замещения линии (рис. 2) можно получить следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{U}_1 \underline{Y}_{sh} + (\underline{U}_1 - \underline{U}_2) \underline{Y}; \\ \underline{I}_2 &= \underline{U}_2 \underline{Y}_{sh} + (\underline{U}_2 - \underline{U}_1) \underline{Y}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$Y = \frac{\underline{U}_1 \underline{I}_2 - \underline{U}_2 \underline{I}_1}{\underline{U}_2^2 - \underline{U}_1^2}; \quad (2)$$

$$\underline{Z} = \frac{1}{Y} = R + jX_L, \quad (3)$$

где  $\underline{I}_1$  and  $\underline{I}_2$  — векторы тока, а  $\underline{U}_1$  и  $\underline{U}_2$  — векторы напряжения на обоих концах линии.

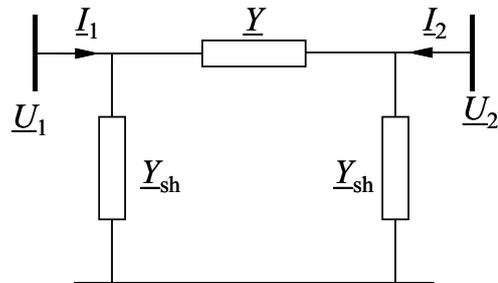


Рис. 2. П-образная схема замещения линии электропередачи

Зависимость между активным сопротивлением и температурой линии  $T$  можно выразить в виде соотношения:

$$R = R_0(1 + a(T - T_0)). \quad (4)$$

Недостатки описанного метода:

в результате расчета получаем среднюю температуру всей линии;

места с высокой температурой, провисания проводов и критические пролеты не выявляются;

необходимо использовать два РМУ: по одному на каждом конце линии;

ошибка приборов может оказать существенное влияние на результат.

Влияние ошибки приборов показано на следующем примере.

Рассмотрим линию напряжением 400 кВ длиной 80 км. На обоих концах получены следующие синхронизированные векторные измерения:  $U_1 = 396,48 \text{ В} \angle -70,36^\circ$  (кВ);  $U_2 = 392,94 \text{ В} \angle -66,51^\circ$  (кВ);  $I_1 = 600,47 \text{ А} \angle 121,53^\circ$ ;  $I_2 = 616,98 \text{ А} \angle -52,78^\circ$ .

С учетом (4)  $R = 2,345 \text{ Ом}$ , а  $T = 21,26 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Если принять точность измерения равной 0,1% вектора напряжения  $\underline{U}_1$ , т.е.  $\underline{U}_1 \cdot 0,001$ , то  $R = 2,656 \text{ Ом}$ , а  $T = 54,62 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Таким образом, неточность измерения существенно влияет на расчет температуры. Эту неточность преодолевает калибровка.

К другим методам косвенного измерения температуры можно отнести метод, основанный на измерении тока [4]:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{t_{th}} T = \frac{1}{t_{th}} I^2 k, \quad (5)$$

где  $k = T_{\max} / I_{\max}^2$  — константа.

Для данного уравнения необходимы текущая температура и температура окружающей среды. Как и предыдущий, этот метод определяет среднюю температуру всей линии.

Недостаток косвенного измерения температуры можно исключить, используя непосредственное измерение температуры. При этом фактическое значение температуры линии измеряется в месте установки датчиков. В получаемом решении учитывается влияние температуры окружающего воздуха и ветра. Датчики температуры устанавливаются, как правило, в критических частях линии [5].

Добавив к информации о линиях точные измерения температуры линии в WAMS, получаем комплексное решение мониторинга ЭЭС.

**Хранение данных.** *Циклическая база данных в реальном времени.* Эта база позволяет хранить измеренные и вычисленные значения токов, напряжений, мощностей, различных показателей устойчивости и т.д. при максимальной частоте выборки: 1 выборка за цикл — 50 (60) выборок в секунду.

Основная база данных включает данные за 14 дней. По желанию можно хранить данные за более длительный период.

*База данных событий.* Функции запуска можно настраивать по измеренным или вычисленным значениям. При превышении порогового значения триггерная функция записывает событие в постоянную базу данных событий. События используются для предупреждения об опасности в реальном времени. Кроме того, их можно использовать для послеаварийного анализа. Таким образом, диспетчер получает информацию для принятия дальнейших решений. События применимы для одной из следующих функций:

выявления уровня, например, повышения или понижения напряжения, повышения или понижения частоты, вычисленных значений и т.д.

выявления разницы, например фазовых углов между двумя векторами напряжения.

*База данных регистрации возмущений.* По аналогии с регистрацией событий система позволяет регистрировать возмущения. Дополнительные уставки для параметризации функций запуска для регистрации возмущений представляют собой время до и после события. Время определяет длину записи хранимых измеренных и вычисленных данных. Продолжительность записи возмущений может достигать 30 мин по данным, выбранным пользователем. Записи возмущений постоянно хранятся на жестком диске независимо от циклической базы данных в реальном времени.

**Система визуализации.** Разработанные графические интерфейсы, удобные для пользователя, являются наиболее важным инструментом для опера-

тивного персонала ЭЭС. Разработанная WAMS базируется на новейших технологиях Internet. Система визуализации позволяет представить многофункциональному Web SCADA:

измерения в реальном времени и вычисленные данные;

ретроспективные данные из базы данных;

события и сигналы опасности;

записи возмущений;

ретроспективные данные, хранимые в локальном компьютере пользователя;

анимацию прошлых событий.

Пользователь может осуществлять выбор между двух- и трехмерными графиками во времени;

векторными диаграммами в полярных координатах;

разрабатываемыми пользователем представлениями;

различными дисплеями для визуализации данных.

«Многооконность», основанная на полном взаимодействии между пользователем и настройками, обеспечивает диспетчерам и инженерам гибкость в создании пользовательских визуализаций. Это позволяет оптимизировать их способность управлять ЭЭС и анализировать их состояние.

Более того, система визуализации позволяет размещать окна на большем числе мониторов, что приводит к лучшему представлению данных.

**Конфигурация.** Конфигурация WAMS выполняется в оболочке UniFusion Engineering Studio; её основные особенности:

конфигурация выполнена на графических функциональных модулях;

функция переноса;

управление сложными процессами без программирования;

удобный для пользователя интерфейс;

диагностика данных в реальном времени;

возможность добавления пользовательских модулей.

**Реализация WAMS.** Описанная система реализуется в передающей сети напряжением 400 кВ в Словении с января 2006 г. Установленная система охватывает различные события. Наиболее значимым событием была авария в ноябре 2007 г., когда объединенная система UCTE разделилась на три зоны [6] и локальные колебания [7].

**Выводы.** Разработанная система предназначена для управления ЭЭС в реальном времени и предупреждения оператора системы в случае, если измеренные или вычисленные величины превышают заданные. Кроме того, система позволяет осуществлять обмен измерениями с другими системами PDC и SCADA. Потенциал WAMS заключается в

WAMP и WAMC в реальном времени, но для широкого использования такого механизма потребуются более надежная инфраструктура коммуникации, чем существующая в настоящее время.

В будущем основное внимание должно быть сосредоточено:

На WAPS ЭЭС,

превентивных и ремонтных процедурах, включая управляющие воздействия переключателей от ветвлений, реактивных шунтов, деление на подсистемы и т.д.;

разработке экспертной системы для предотвращения системных аварий;

релейной защите системы для классических схем защиты;

Комплексных функциях оценки состояния.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Veloza O.P., Cespedes R.H.** Regulatory Mechanisms to Mitigate the Vulnerability of Power Systems to Blackouts.— Transmission & Distribution Conference and Exposition: (TDC '06. IEEE/PES), Latin America, 18 Aug., 2006.

2. **UCTE** Final Report «System Disturbance on 4 November 2006»: <http://www.ucte.org/news>.

3. **Zima M., Larsson M., Korba P. et al.** Design Aspects for Wide-Area Monitoring and Control Systems. — Proc. of the IEEE, 2005, vol. 93, № 5.

4. **IEC 255-8** Standard. Electrical relays. Thermal electrical relays, Second edition, 1990-09.

5. **Lovrenčič V., Polak M., Tomažič R., Peuliž S.** Diagnostics of overhead lines provides benefits to a transmission line operator. — 9 Konf. Slovenskih elektroenergetikov (CIGRE ЛБК В2-12), Kranska Gora (Slovenia), 2009 (in Slovenian language).

6. **Babnik T., Gabrijel U., Mahkovec B., Perko M., Sitar G.** Wide area measurement system in action. — Power Tech. Conference Lausanne (Switzerland), 1 — 8 July 2007.

7. **Kostevc J., Gabrijel U., Sitar G.** WAMS in action. — 7th Balkan Power Conference, Љibenik (Croatia).

*Авторы: Бабник Тадея получила степень доктора философии в области электротехники в Люблянском университете в 2003 г. Руководитель программы ЭЭС в компании ELPROS Ltd (Словения).*

*Маховец Боян окончил факультет робототехники Люблянского университета в 1999 г. Генеральный директор компании ELPROS Ltd.*

*Перко Марко окончил факультет робототехники Люблянского университета в 2001 г. Руководитель проектов по научным исследованиям и конструкторским разработкам и разработчик математического обеспечения в компании ELPROS Ltd.*