



PS5 – S6-04



## Использование информации, полученной от устройств синхронизированных измерений типа PMU, для построения полной математической модели энергосистемы

И.Е. НАУМКИН, М.А. БАЛАБИН, Н.Б. ЛАВРУШЕНКО, Р.И. НАУМКИН

Филиал ОАО «НТЦ электроэнергетики» СибНИИЭ

Россия

[ienau@cn.ru](mailto:ienau@cn.ru); [ie-nau@yandex.ru](mailto:ie-nau@yandex.ru)

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Энергосистема, математическая модель, PMU, синхронизированные измерения.

### 1 ВВЕДЕНИЕ

В последнее время начинается широкое использование устройств синхронизированных измерений (PMU- Phasor Measurement Unit) для целей диагностики моделей электроэнергетических систем (ЭЭС). Под диагностикой электрической цепи понимается определение неизвестных параметров электрической цепи при известных топологии цепи, части параметров цепи и ее реакции на различные воздействия.

Полная математическая модель электроэнергетической системы (ЭЭС) должна учитывать электромагнитные и электромеханические переходные процессы (ЭМагПП и ЭМехПП) с описанием изменения частот вращения синхронных машин и моментов турбин, а также учет действия систем автоматического регулирования. Эта модель представляет собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений, решение которой отображается совокупностью вынужденных и свободных составляющих переменных системы.

На основе полной математической модели ЭЭС может быть получен ряд упрощенных моделей, справедливых на разных этапах развития переходного процесса. Так *на первом этапе* важным является учет ЭМагПП в элементах электрической сети и в статорных обмотках синхронных машин. ЭМехПП можно пренебречь и считать, что частота вращения роторов машин постоянна. Интервал времени, на котором справедлива данная модель, определяется временем затухания ЭМагПП. *На втором этапе* можно рассматривать только ЭМехПП с пренебрежением ЭМагПП. В этом случае все дифференциальные уравнения, описывающие элементы электрической сети и статорные обмотки генераторов, становятся алгебраическими. Дифференциальными уравнениями будут описываться процессы в обмотках возбуждения синхронных машин и процессы движения роторов. *На третьем этапе* рассматривается общее движение генераторов системы, когда взаимные качания генераторов относительно друг друга заканчиваются и устанавливается синхронное общее движение роторов машин, что приводит к появлению в ЭЭС новой частоты. Эта частота изменяется и по окончании переходного процесса в случае сохранения устойчивости становится равной частоте нового установившегося режима.

Математические модели для первого этапа развития переходного процесса используются при расчетах перенапряжений, когда производится выбор коммутационного и защитного оборудования, а также при разработке устройств релейной защиты. Математические модели для второго и третьего этапов развития переходного процесса используются для исследования динамической устойчивости ЭЭС и разработке алгоритмов противоаварийной автоматики.



protection) отличаются, при этом главным требованием является адекватность работы в переходных режимах, когда, собственно говоря, используется и управление, и защита ЭЭС.

Если данные сети  $|\dot{X}_{Tj}|$  будут регистрироваться каждый период (0,02с), то граничная частота процесса, доступная для наблюдения будет равна 25 Гц. Для управления электромеханическими процессами этого более чем достаточно.

Однако в любой электрической схеме при переходных процессах присутствуют как вынужденные составляющие, обеспеченные синхронными генераторами, так и свободные составляющие, обеспеченные емкостными и индуктивными элементами ЭЭС. При неизвестной частоте вынужденной составляющей отделить вынужденную составляющую от свободных составляющих во время переходного процесса в данной конкретной точке электрической схемы не представляется возможным.

Обратим внимание, что на входе устройств PMU<sub>1</sub>, PMU<sub>2</sub>, PMU<sub>3</sub>, ..., PMU<sub>k</sub> имеются переменные  $x(t)$ , которые отображают переходные процессы после дискретизации до граничной частоты 3,2 кГц (в варианте цифровой подстанции – до 6,4 кГц), т.е. практически все электромагнитные (коммутационные) и электромеханические процессы, описываемые полной математической моделью ЭЭС, состоящей из совокупности дифференциальных и алгебраических уравнений.

### 3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PMU ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЭС

Представим на рис. 2 другой способ использования информации об ЭЭС, поступающей на PMU.

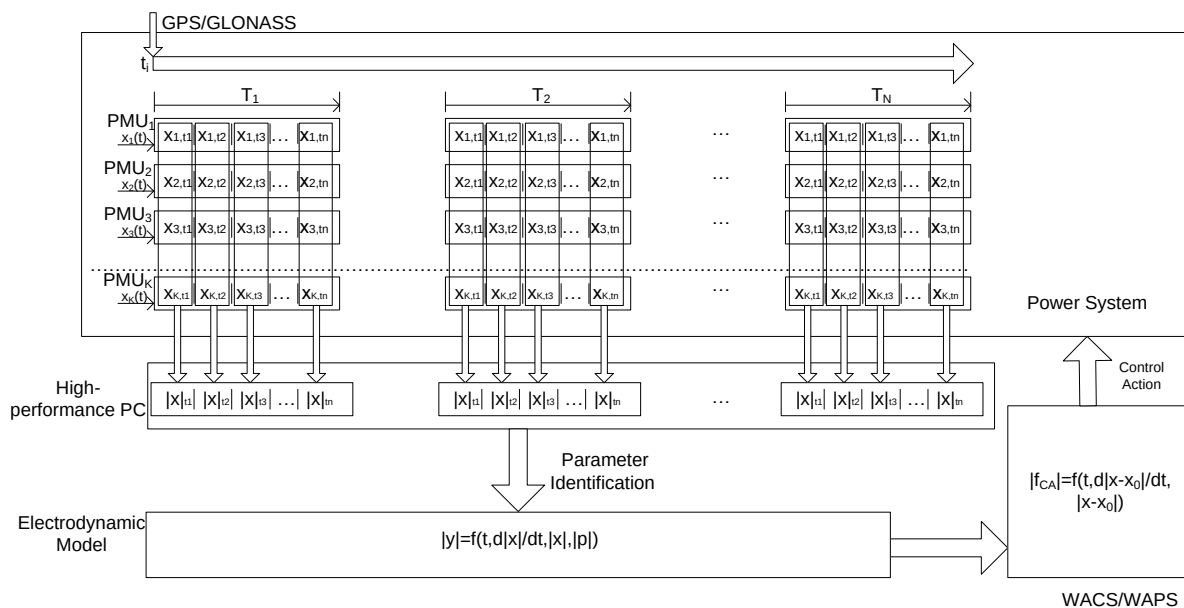


**Рис. 2:** Альтернативный способ использования PMU в энергосистеме

Дискретные величины мгновенных значений  $x_{i,t\tau}$  от каждого PMU<sub>i</sub> собираются в высокопроизводительном компьютере (High-performance PC – HP PC). Величина  $|x|_{t\tau}$  будет являться срезом мгновенных значений для электродинамической модели ЭЭС, представленной в виде  $|y| = f(t, \frac{d|x|}{dt}, |x|, |p|)$ , где  $|p|$  - вектор параметров. На каждом отрезке  $T_j$  будет получаться совокупность величин  $|x|_{t1}, |x|_{t2}, |x|_{t3}, \dots, |x|_{tn}$ , которая может быть использована для идентификации представленной модели ЭЭС в алгебро-дифференциальном виде.

Произведем оценку передаваемой и накапливаемой информации при данном способе использования PMU. Каждый передаваемый кадр будет содержать 700 бит:

| Данные измерений:<br>4 тока, 4 напряжения | Сигнал GPS/ГЛОНАСС | Служебная<br>информация | Накладная<br>информация TCP | Накладная<br>информация IP |
|-------------------------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 128 бит                                   | 64 бит             | 256 бит                 | 192 бит                     | 60 бит                     |

При номинальной частоте сети 50 Гц с каждого PMU будет передаваться  $700 \times 128(256) \times 50 = 4375(8750)$  кбит/с<sup>3</sup>. К приемному компьютеру при скорости сети Ethernet 100 Мбит/с может быть подключено до 23(11) PMU. Соответственно, за 1 с в приемном компьютере будет накапливаться около 8 Мбайт информации (без накладной информации TCP и IP). Если сохранение полученной информации производится по кольцу, то используя 1 Гбайт оперативной памяти компьютера, возможно хранить информацию об ЭЭС за 125 с. Практически для всех переходных процессов в ЭЭС такой продолжительности регистрации достаточно, при необходимости оперативную память можно увеличить или задействовать дисковую память.

Представленный на рис.2 способ использования PMU может использоваться параллельно с традиционным способом, представленным на рис.1. Однако, получение синхронизированных векторных величин можно перенести на НР РС, тогда на устройства нижнего уровня остается только задача дискретизации и передачи на верхний уровень дискретных значений. Вся обработка, в том числе и получение синхронизированных векторных значений, производится на одном высокопроизводительном компьютере<sup>4</sup>. Достоинством такой обработки информации может являться возможность отделения вынужденной составляющей процесса в сети от свободных составляющих. Также к достоинствам можно отнести меньшее влияние на результат расчета потерь отдельных значений. Недостаток – повышенные требования к коммуникационным сетям по скорости передачи.

Принципиальным изменением в рассматриваемом случае будет являться возможность оперировать с полной математической моделью ЭЭС, которая открывает новые возможности в построении систем управления и защиты ЭЭС.

Для больших ЭЭС можно применить построение системы с большим количеством уровней сбора и обработки информации. Рассмотренный второй уровень из НР РС можно рассматривать как систему распределенных вычислений более высокого третьего уровня, функционирующего на уровне больших ЭЭС.

#### **4 ДИАГНОСТИКА ПОЛНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЭС**

Любая алгебро-дифференциальная математическая модель ЭЭС представляется в разностном виде как система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с разреженной матрицей большой размерности. Решение задач диагностики с разреженными матрицами решается методами декомпозиции [1]. В [2,3] рассмотрены вопросы анализа больших схем по подсхемам, когда большая матрица разбивается на блочно-диагональные матрицы меньших размеров с последующим решением на многопроцессорных компьютерах с применением методов параллельного программирования. Разработанные методы для анализа также эффективно могут быть применены и при задачах диагностики электрических цепей.

В настоящее время методы диагностирования параметров ЭЭС по массивам мгновенных значений напряжений и токов усиленно разрабатываются [4].

#### **5 ВЫВОДЫ**

1. Применение устройств синхронизированных векторных измерений типа PMU в системах мониторинга параметров режимов ЭЭС производится уже по отлаженной технологии. Использование векторных параметров для верификации моделей энергосистем также разработано с приемлемой детализацией.

<sup>3</sup>Можно один кадр формировать с несколькими данными измерений, тогда, соответственно, количество передаваемых бит в секунду будет снижено.

<sup>4</sup>Устройства PMU при таком способе получения синхронизированных векторных значений можно назвать распределенными PMU.

2. Наряду со стандартной архитектурой построения системы сбора и обработки информации о режимах ЭЭС возможны альтернативные архитектуры, которые могут применяться вместо существующих или параллельно существующим.
3. Система сбора синхронизированной мгновенной информации может быть применена для диагностики полной математической модели ЭЭС, основанной на системе алгебраических и дифференциальных уравнений. Применение такой модели ЭЭС открывает перспективы для разработки новых систем управления и защиты энергосистем.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Бутырин П.А., Васьковская Т.А. Принципы декомпозиции сложных электрических цепей при их диагностике по частям // Электричество – 2001 – № 6 – С. 41-48.
- [2] Naumkin I.E. "Digital Electromagnetic Model of Electrical System for Investigation of EHV and UHV Transmission Systems," in Proc. 2003 International Scientific and Technical Conference on AC Power Delivery at Long and Very Long Distances (Novosibirsk, Russia), v.2, pp. 23-35 (in Russian).
- [3] Naumkin I., Balabin M., Lavrushenko N., Naumkin R. Multipurpose power system simulator: implementation based on modern principles. International Conference on Power Systems Transients (IPST2009) in Kyoto, Japan June 3-6, 2009.
- [4] Гольдштейн Е.И., Бацева Н.Л., Джумик Д.В., Усов Ю.П. Диагностирование электрических цепей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 152 с.