



PS2 – S8-05



## Оценка достоверности динамических моделей сложных электроэнергетических систем по данным СМПР

А.В. ЖУКОВ<sup>1</sup>, Ю.А. КУЛИКОВ<sup>1</sup>, А.С. ГЕРАСИМОВ<sup>2</sup>, А.Х. ЕСИПОВИЧ<sup>2</sup>,  
А.Н. СМОРНОВ<sup>2</sup>

ОАО «СО ЕЭС»<sup>1</sup>, ОАО «НИИПТ»<sup>2</sup>

Россия

[smirnov\\_a@niipt.com](mailto:smirnov_a@niipt.com)

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Цифровая динамическая модель, переходный процесс, верификация, адекватность, количественные показатели качества.

### 1 ВВЕДЕНИЕ

Повышение достоверности цифровых моделей достигается в процессе их верификации.

Под верификацией цифровой динамической модели понимается процедура формирования, проверки и необходимой настройки подробной динамической модели энергосистемы для достижения качественного и, с приемлемой точностью, количественного совпадения реальных зарегистрированных процессов, возникающих в энергосистеме при различных возмущениях, с аналогичными моделируемыми процессами при этих же возмущениях.

Единственным инструментом, позволяющим получить необходимую информацию об электромеханическом переходном режиме для верификации динамической цифровой модели, является система мониторинга переходных режимов (СМПР), которая представляет собой аналог систем WAMS (Wide Area Measurement System).

Из обзора мирового опыта верификации цифровых моделей энергосистем по данным WAMS можно сделать вывод о том, что в настоящее время каких-либо устоявшихся критериев, по которым оценивается точность цифровой модели энергосистемы, не существует. Критерии выбираются экспертно в зависимости от конкретной задачи, для которой предназначена верифицируемая модель. Следует также подчеркнуть, что все применяемые критерии используются только для качественной оценки адекватности цифровых динамических моделей. Каких-либо количественных показателей, позволяющих объективно оценить достоверность разработанных моделей, в зарубежной литературе не приводится.

Вместе с тем во многих случаях полезно иметь формальное подтверждение адекватности разработанной модели, представленное в виде количественной оценки степени соответствия модели тому реальному явлению или объекту, для описания которого она строится.

Первый отечественный опыт верификации цифровых моделей по данным СМПР был получен в рамках проекта «ТЭО синхронного объединения энергосистем УСТЕ и ЕЭС/ОЭС». В качестве параметров верификации использовались частота напряжения в различных точках ЕЭС/ОЭС и перетоки активной мощности по некоторым линиям электропередачи [1]. В дальнейшем этот опыт был использован и значительно расширен в ходе работ по созданию и верификации базовой динамической модели (БДМ) ЕЭС/ОЭС, выполненных ОАО «НИИПТ» в 2007–2009 годах [2]. За это время верификация БДМ ЕЭС/ОЭС была выполнена по семи

технологическим нарушениям, которые происходили в различное время года, различное время суток и в различных схемно-режимных условиях [3].

Цикл работ по верификации БДМ ЕЭС/ОЭС позволил в полной мере отработать технологию верификации динамических моделей больших и протяженных энергообъединений. На основании полученного опыта в ОАО «НИИПТ» был разработан проект «Методических указаний по принципам и критериям верификации динамических моделей». «Методические указания...» включают в себя принципы и критерии верификации цифровых динамических моделей больших протяженных энергосистем, которые могут применяться для исследования динамических свойств реальных энергообъединений, а также для анализа причин возникновения крупных системных аварий и технологических нарушений. Эти «Методические указания...» устанавливают основные требования, предъявляемые к таким моделям, а также содержат количественные показатели качества верификации, позволяющие получать объективную оценку достоверности разработанных моделей.

Настоящий доклад посвящен описанию критериев верификации и количественных показателей оценки достоверности динамических моделей сложных электроэнергетических систем.

## **2 КРИТЕРИИ ВЕРИФИКАЦИИ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

При сопоставлении результатов расчетов электромеханических переходных процессов, выполненных с использованием цифровой модели энергосистемы, с данными, полученными с помощью цифровых регистраторов СМРП при технологических нарушениях, предлагается использовать следующие электрические параметры:

- значения частоты напряжения в узлах установки цифровых регистраторов;
- значения перетоков активной мощности по линиям, на которых производится регистрация аварийного процесса;
- значения относительных (взаимных) углов напряжения между различными точками энергообъединения.

Частота и относительный угол являются системными параметрами, характер их изменения наиболее полно отражает динамические свойства энергообъединения в целом. В свою очередь характер изменения активных мощностей по линиям отражает динамические свойства отдельных районов. Опыт использования базовой динамической модели ЕЭС/ОЭС показал, что для верификации динамической модели большой протяженной энергосистемы достаточно использовать три перечисленных параметра.

Качество цифровой модели энергосистемы предлагается оценивать по следующим критериям:

- совпадение собственных частот межзональных колебаний (в диапазоне 0.05 – 0.5 Гц);
- воспроизведение противофазы межзональных колебаний в различных местах сети;
- сходство демпфирования колебаний (воспроизведение амплитуд колебаний рассматриваемых параметров и времени их демпфирования);
- временной сдвиг отклонения частоты, наблюдаемый на различных участках;
- совпадение частотных характеристик, таких как скорость изменения частоты, максимальное и установившееся отклонение частоты, в узлах установки цифровых регистраторов.

Визуальное сравнение зарегистрированных с помощью СМРП и полученных при моделировании процессов по предложенным критериям позволяет сделать вывод о достоверности разработанной цифровой модели. Однако применение при верификации только качественных критериев является недостаточным условием для оценки степени адекватности модели, так как эта оценка основана на субъективном мнении эксперта, выполняющего верификацию. Для объективного подтверждения степени достоверности разработанной модели необходимо выполнить количественную оценку степени соответствия модели тому реальному явлению или объекту, для описания которого она строится.

В качестве количественной характеристики адекватности модели предлагается принять меру близости модели оригиналу, определяя ее как расстояние между моделью и оригиналом в

некотором метрическом пространстве. Для количественной оценки качества верификации динамической модели энергосистемы предлагаются следующие показатели:

- 1) максимальные отклонения частоты напряжения в точках установки цифровых регистраторов СМПР;
- 2) установившееся значение частоты напряжения;
- 3) максимальные амплитуды колебаний взаимных углов напряжения;
- 4) коэффициенты корреляции между измеренными и расчетными изменениями рассматриваемых параметров в точках установки регистраторов СМПР;
- 5) величины наблюдаемых регулярных частот колебаний.

Точность совпадения расчетных и измеренных **максимальных отклонений частоты напряжения** в местах установки цифровых регистраторов позволяет сделать вывод об адекватности моделирования характеристик первичного регулирования, а также о характеристиках нагрузки в различных частях энергосистемы. Для получения количественного показателя качества моделирования на построенных графиках расчетного и измеренного изменения частоты при технологическом нарушении определяются значения максимальных отклонений частоты от исходного значения (рис. 1). Погрешность воспроизведения максимальных отклонений частоты напряжения ( $F_{\text{макс}}$ ) в динамической модели вычисляется по формуле:

$$F_{\text{макс}} = \left| 1 - \frac{f_{\text{м\_откл\_э}}}{f_{\text{м\_откл\_м}}} \right| \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $f_{\text{м\_откл\_э}}$  – максимальное отклонение частоты напряжения, определенное по экспериментальным данным;

$f_{\text{м\_откл\_м}}$  – максимальное отклонение частоты напряжения, определенное в результате цифрового моделирования.

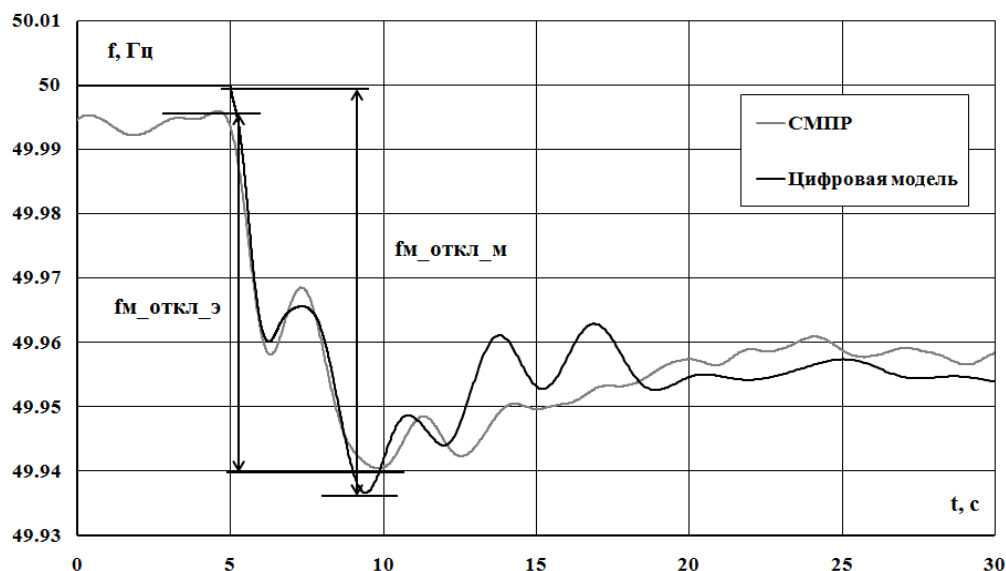


**Рис. 1:** Определение величин измеренного и расчетного максимального отклонений частоты напряжения

Точность совпадения расчетного и измеренного **установившегося значения частоты** в энергосистеме после возникновения небаланса мощности позволяет сделать вывод о достоверности учета в цифровой модели энергосистемы вращающихся резервов мощности и

статизмов регуляторов скорости энергоблоков. На рисунке 2 показан метод определения отклонений частоты напряжения от исходного значения до установившегося.

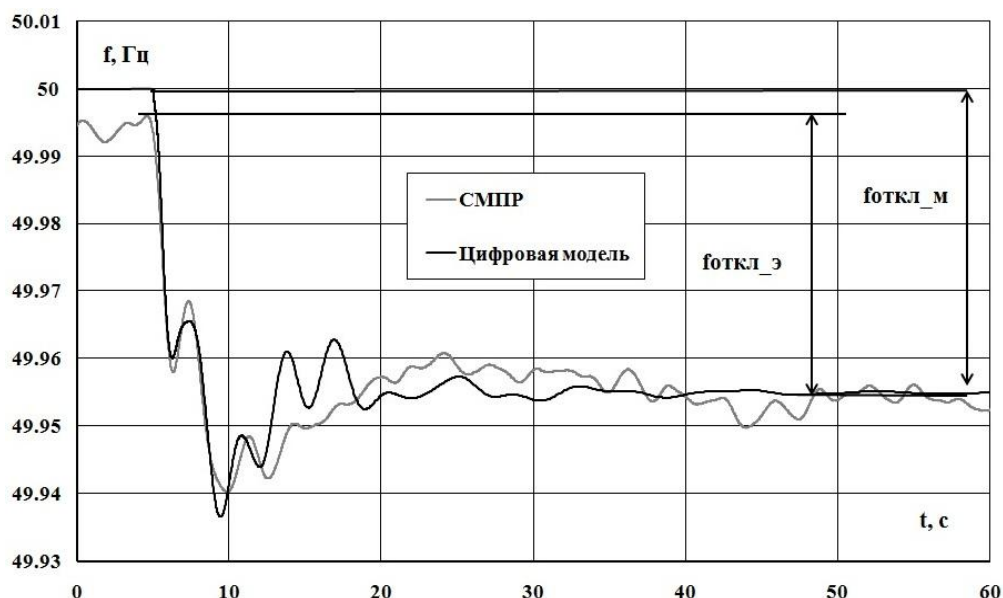


Рис. 2: Определение величин измеренного и расчетного установившегося значения частоты напряжения

Погрешность воспроизведения установившегося значения частоты ( $F_{уст}$ ) в динамической модели вычисляется по формуле:

$$F_{уст} = \left| 1 - \frac{f_{откл\_э}}{f_{откл\_м}} \right| \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $f_{откл\_э}$  – отклонение частоты напряжения от исходного значения до установившегося, определенное по экспериментальным данным;

$f_{откл\_м}$  – отклонение частоты напряжения от исходного значения до установившегося, определенное в результате цифрового моделирования.

Достоверность учета инерционных постоянных генераторов, присутствующих в модели, следует оценивать по точности совпадения расчетных и измеренных **максимальных отклонений взаимных углов напряжения** между различными точками энергосистемы при технологическом нарушении.

В отличие от частоты, предаварийные величины взаимных углов между различными точками энергосистемы, а также разности между их начальным и максимальным значениями, могут значительно отличаться. В связи с этим использование для взаимных углов показателя качества верификации на основе сравнения абсолютных величин будет неэффективным. Для получения количественной оценки адекватности модели рекомендуется сравнивать относительные величины максимальных отклонений взаимных углов.

Для этого на построенных графиках расчетного и измеренного изменения взаимного угла при технологическом нарушении определяются начальные и максимальные значения взаимных углов (рис. 3) и рассчитываются относительные максимальные амплитуды колебаний, полученные по экспериментальным данным ( $A_э$ ) и в результате цифрового моделирования ( $A_м$ ):

$$A_э = \frac{\delta_{\max\_э}}{\delta_{\text{нач\_э}}}, \quad A_м = \frac{\delta_{\max\_м}}{\delta_{\text{нач\_м}}}, \quad (3)$$

где  $\delta_{\text{макс\_э}}$  – максимальное отклонение взаимного угла, определенное по экспериментальным данным;

$\delta_{\text{макс\_м}}$  – максимальное отклонение взаимного угла, полученное в результате цифрового моделирования;

$\delta_{\text{нач\_э}}$  – начальное значение взаимного угла, определенное по экспериментальным данным;

$\delta_{\text{нач\_м}}$  – начальное значение взаимного угла, полученное в результате цифрового моделирования.

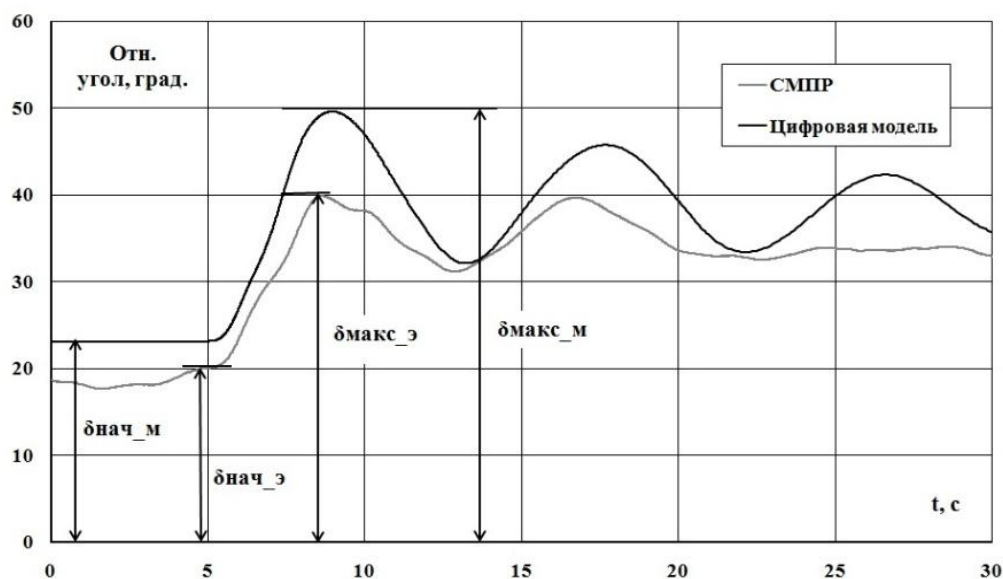


Рис. 3: Определение величин измеренного и расчетного относительных максимальных отклонений взаимных углов

Погрешность воспроизведения максимальных амплитуд колебаний взаимных углов напряжения ( $A_{\text{макс}}$ ) в динамической модели вычисляется по формуле:

$$A_{\text{макс}} = \left| 1 - \frac{A_{\text{э}}}{A_{\text{м}}} \right| \cdot 100\% \quad (4)$$

В случае если взаимный угол между двумя точками энергосистемы в ходе переходного процесса меняет знак, относительные максимальные амплитуды колебаний рассчитываются следующим образом:

$$A_{\text{э}} = \frac{|\delta_{\text{макс\_э}}| + |\delta_{\text{нач\_э}}|}{|\delta_{\text{нач\_э}}|}, \quad A_{\text{м}} = \frac{|\delta_{\text{макс\_м}}| + |\delta_{\text{нач\_м}}|}{|\delta_{\text{нач\_м}}|} \quad (5)$$

Для оценки точности воспроизведения на цифровой модели характера и скорости изменения параметров энергосистемы можно воспользоваться корреляционным анализом, позволяющим определить корреляционную связь между расчетным и измеренным изменением параметров энергосистемы. Для этого рассчитывается **коэффициент корреляции** Пирсона:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (6)$$

где  $X = (x_1, \dots, x_n)$  – выборка измеренных значений рассматриваемого параметра;

$Y = (y_1, \dots, y_n)$  – выборка расчетных значений рассматриваемого параметра;

$\bar{x}, \bar{y}$  – средние значения выборок  $x$  и  $y$ .

Вычисление коэффициента корреляции Пирсона выполняется для двух явлений с равным шагом выборки по времени и проводится для всех сравниваемых параметров (частота, мощность и относительный угол) во всех точках установки цифровых регистраторов СМНР. Оценка достоверности динамической модели по коэффициентам корреляции осуществляется в соответствии со шкалой Чеддока.

Адекватность моделирования частотных свойств энергосистемы следует оценивать по точности воспроизведения **наблюдаемых регулярных частот колебаний**, и в особенности собственных частот межзональных колебаний в диапазоне 0,05–0,5 Гц.

Для определения показателей качества воспроизведения регулярных частот колебаний в цифровой динамической модели энергосистемы необходимо выполнять спектральный анализ процессов изменения рассматриваемых параметров, рассчитанных на цифровой модели и полученных в результате измерений с помощью регистраторов СМНР. Полученные на основе измеренных и расчетных данных значения регулярных частот колебаний сравниваются между собой и делается вывод о степени их совпадения.

Сравнив измеренные и расчетные параметры энергосистемы и вычислив указанные показатели, можно получить количественную оценку адекватности верифицированной модели.

На основании опыта верификации БДМ ЕЭС России были установлены численные значения каждого показателя, позволяющие определить степень достоверности разработанной цифровой динамической модели. Оценочные значения показателей приведены в таблице 1.

| Степень совпадения | $F_{\text{макс}}$ | $F_{\text{уст}}$ | $A_{\text{макс}}$ | Коэффициент корреляции | Расхождение в частотах |
|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| отличная           | $\leq 10\%$       | $\leq 5\%$       | $\leq 5\%$        | 0,9 – 1,0              | $\pm 0,05$ Гц          |
| хорошая            | $\leq 15\%$       | $\leq 10\%$      | $\leq 10\%$       | 0,7 – 0,9              | $\pm 0,1$ Гц           |
| удовлетворительная | $\leq 20\%$       | $\leq 15\%$      | $\leq 15\%$       | 0,5 – 0,7              | $\pm 0,2$ Гц           |

Табл. 1: Оценочные значения показателей качества

Каждый из рассмотренных показателей характеризует те или иные динамические свойства реального энергообъединения. Величина показателя помогает понять, насколько точно и достоверно разработанная динамическая модель энергосистемы позволяет воспроизводить эти свойства. Неудовлетворительные значения каких-либо показателей свидетельствует о некорректности учета в динамической модели соответствующих характеристик и параметров элементов энергосистемы. Изменяя, в процессе настройки динамической модели, необходимые характеристики и параметры элементов (статические и динамические характеристики нагрузки, инерционные постоянные эквивалентных генераторов, параметры регуляторов скорости энергоблоков и т.д.) можно добиться требуемого значения соответствующего показателя.

Численные значения показателей качества изначально существенно зависят от полноты и достоверности исходных данных о технологическом нарушении, необходимых для

верификации динамической модели энергосистемы. Особенно важное значение имеют точность воспроизведения предаварийного электрического режима, полнота и достоверность информации о характеристиках и параметрах, составе и загрузке энергоблоков, участвовавших в покрытии графика нагрузки, а также точность учета потребления энергообъединения в этом режиме.

Переход от принятых в настоящее время качественных критериев к объективным количественным показателям оценки достоверности динамических моделей стал возможен благодаря тому, что для верификации модели ЕЭС/ОЭС был использован большой объем достоверной доаварийной информации о состоянии энергосистем Восточной синхронной зоны. Это стало возможным потому, что Системный оператор ЕЭС России располагает исчерпывающей информацией о состоянии энергосистемы, в том числе и данными о составе и загрузке генераторного оборудования в предаварийном режиме.

### 3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт, приобретенный ОАО «НИИПТ» в процессе выполнения верификации БДМ ЕЭС/ОЭС России, позволил разработать «Методические указания по принципам и критериям верификации динамических моделей», которые впервые включают количественные критерии качества верификации динамических моделей. Неудовлетворительная оценка качества верификации по любому из предложенных критериев свидетельствует о неправильном учете в цифровой динамической модели тех или иных характеристик реальной энергосистемы. «Методические указания...» содержат рекомендации по способам коррекции характеристик динамической модели в зависимости от вида критерия, по которому получена неудовлетворительная оценка качества верификации.

Практическое применение разработанных количественных критериев верификации модели при нескольких технологических нарушениях подтвердило эффективность разработанной методики, которая позволяет получить объективную оценку качества динамических моделей сложных электроэнергетических систем [4].

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аюев Б.И., Герасимов А.С., Есипович А.Х., Куликов Ю.А. Верификация цифровых моделей ЕЭС/ОЭС. Электричество, №5, 2008.
- [2] IPS/UPS Reference Dynamic Model and its Validation per WAMS Recordings. Ayuev B.I., Dyachkov V.A., Zhukov A.V., Kouzmin S.E., Kulikov Y.A., Levandovsky A.V., Gerasimov A.S., Esipovich A.H., Smirnov A.N. Monitoring of Power System Dynamics Performance, 28–30 April 2008, Saint Petersburg.
- [3] Герасимов А.С., Есипович А.Х., Куликов Ю.А., Смирнов А.Н. Опыт верификации динамической модели ЕЭС/ОЭС по данным системы мониторинга переходных режимов. Сборник научных трудов «Известия НИИ постоянного тока». СПб, 2009.
- [4] Смирнов А.Н. Применение количественных показателей для оценки достоверности динамических моделей сложных энергообъединений. Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи», 17–19 ноября 2010, Екатеринбург.