

ЛИТЕРАТУРА:

1. Загретдинов А.Р., Гапоненко С.О., Серов В.В. Концепция оценки технического состояния оборудования на основе ННТ- преобразования виброакустических сигналов // Инженерный вестник Дона, 2015, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3243.
2. Сафиуллин Н.Т. Разработка методики анализа временных рядов с помощью преобразования Хуанга-Гильберта: Кандидатская диссертация / Новосибирск, 2015. – 193 с.
3. Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. The Hilbert-Huang transform and its applications // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005. -325 p.

Научный руководитель: А.Р. Загретдинов, к.т.н., доцент, Казанский государственный энергетический университет.

МЕТОДИКА ГАРАНТИРОВАННОЙ ВЕРИФИКАЦИИ РАСЧЕТОВ РЕЖИМОВ И ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.А. Суворов, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов
Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭЭС

Поскольку основу решения большинства важнейших задач проектирования, исследования и эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС) составляет использование информации о процессах в оборудовании и ЭЭС в целом при всевозможных нормальных и аномальных режимах их работы, неизбежен вывод, что главной причиной недостаточно надежного и эффективного решения этих задач является использование неполной и недостоверной информации. Согласно обобщенной статистике 50% таких аварий в мировой электроэнергетике происходит из-за неправильных действий релейной защиты, автоматики и ошибочных или запоздалых действий диспетчерского персонала.

Известная специфика и сложность современных ЭЭС исключают возможность получения всей необходимой информации натурным путем, а также посредством физического моделирования, поэтому основным способом ее получения служит математическое моделирование. Однако совокупная математическая модель любой реальной ЭЭС, даже с учетом допустимого частичного эквивалентирования, всегда содержит жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности, которая согласно теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений плохо обусловлена на ограничительных условиях применимости методов их численного интегрирования: условие Липшица, теорема Далквиста и др., и соответственно не может быть решена удовлетворительно. Единственным путем повышения обусловленности является снижение жесткости, дифференциального порядка и ограничение интервала решения, что реализуемо только за

счет применения существенных упрощений и ограничений: декомпозиция объективно единого и непрерывного спектра квазиустановившихся и переходных процессов в ЭЭС; упрощения математических моделей оборудования и ЭЭС в целом; ограничения интервала воспроизведения процессов. При этом независимо от упрощений и ограничений, всегда неизвестной остается методическая ошибка численного решения, определение которой в теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений отнесено к категории фундаментальных проблем. Совокупность обозначенных упрощений, ограничений и неизвестной методической ошибки порождает принципиально неразрешимый в рамках данного методологически одностороннего сугубо численного подхода вопрос полноты и достоверности получаемой таким путем информации о процессах в ЭЭС. Поэтому обязательной является верификация каждого решения, воспроизводящего какой-либо процесс.

Попыткам такой верификации посвящен ряд отечественных и зарубежных проектов:

1. Анализ тяжелой системной аварии в Западной энергосистеме США, Bonneville Power Administration, U.S. Department of Energy.
2. PEGASE (Pan European Grid Advanced Simulation and State Estimation) «Разработка усовершенствованных методов оценивания состояния и моделирования Единой Европейской электроэнергетической сети».
3. «Методические указания по принципам и критериям верификации динамических моделей» ОАО «СО ЭЭС».

Однако опубликованные результаты проводимой верификации [1-3] свидетельствуют о том, что получаемая путем моделирования информация о процессах в ЭЭС значительно не соответствует реальным данным, полученным с помощью устройств регистрации, а адаптация результатов расчета к натурным данным осуществляется путем различного произвольного варьирования параметров, как правило моделей статических характеристик нагрузок и настроек регуляторов. В результате удается получить весьма приближенное воспроизведение конкретного процесса, отражающее по существу тренд изменения параметров. Возможности такой верификации ограничены лишь процессами, для которых имеются натурные данные, а воспроизведение остального многообразия процессов остается принципиально неverifiedируемым и поэтому существующее в настоящее время в мировой электроэнергетике направление верификации не позволяет решить данную проблему в принципе.

Для радикального решения данной проблемы предлагается использовать в качестве источника данных для верификации расчетов режимов и процессов в ЭЭС реализованный в соответствии с комплексным подходом всережимный моделирующий комплекс реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС) [4-6] согласно предлагаемой методике:

1. Создается тестовая математическая модель реальной ЭЭС, которая воспроизводится в ВМК РВ ЭЭС и в verifiedируемом средстве моделирования ЭЭС.
2. Надежная верификация ВМК РВ ЭЭС выполняется по достоверизованным данным ТС и ТИ ОИК квазиустановившегося режима воспро-

изводимой ЭЭС. Такая верификация осуществима, поскольку в комплексе для всего единого спектра процессов используется одно и та же полная математическая модель ЭЭС и методически точный метод её решения, то любой воспроизводимый процесс, в том числе квазиустановившийся, является результатом решения этой математической модели и его верификация возможна сопоставлением с соответствующими достоверизованными данными ОИК тестовой ЭЭС. В качестве примера верификации ВМК РВ ЭЭС представлено сравнение результатов воспроизведения энергосистемы Томской области с контрольно-диспетчерскими замерами, сформированными на основе данных ОИК Томской ЭЭС. Как видно из рисунков 1 и 2 отличия составляют не более 5%.

Наименование подстанции	Uном, кВ	U, кВ	Uоик, кВ	$\Delta U_{о-т}$, %
Парабель-220	220	224.99	231	2.47
Чаженто - 220	220	227.98	237	3.61
Володино - 220	220	229.41	230	0.22

Рис. 1. Табличная форму динамической панели наблюдений напряжений в сети 220 кВ по данным ВМК РВ ЭЭС, ОИК Томской ЭЭС и их разность

Наим. ЛЭП	P1, МВт	P1оик, МВт	$\Delta P1$, %	P2, МВт	P2оик, МВт	$\Delta P2$, %	I, кА	Iоик, кА	ΔI , %
ВЛ-526	63.98	62	3.19	-63.35	-61	3.86	0.077	0.078	1.15
ВЛ-527	270.35	265	2.02	-268.42	-265	1.29	0.336	0.331	1.44
Т-201	51.31	52	1.32	-51.19	-50	2.38	0.149	0.147	1.56
Т-202	62.73	62	1.17	-62.58	-63	0.66	0.187	0.181	3.19

Рис. 2. Табличная форму динамической панели наблюдений режимных параметров линий электропередач по данным ВМК РВ ЭЭС, ОИК Томской ЭЭС и их разность

Так как комплекс реализует тестовую математическую модель реальной ЭЭС с гарантированной приемлемой точностью на непрерывном интервале протекания процессов, то точность воспроизведения квазиустановившегося режима можно распространять на весь значимый спектр режимов и процессов, включая коммутационные перенапряжения.

1. Формируется требуемый для верификации обоснованный спектр нормальных и аномальных режимов и процессов.
2. Разрабатываются программные процедуры ВМК РВ ЭЭС реализации сравнения результатов воспроизведения, и также осуществляющие обработку результатов сравнения и их всестороннее отображение в виде таблиц и графиков.
3. В случае неудовлетворительных результатов верификации, что обычно имеет место, производится попытка адаптации, осуществляемая путем формирования сценариев адаптации в верифицируемом средстве в рамках его возможностей.
4. Интерактивно или автоматизировано в верифицируемом средстве реализуются сценарии адаптации, после этого повторяется сравнение ре-

зультатов моделирования, до тех пор пока не будет достигнута необходимая приемлемая точность воспроизведения требуемых процессов в верифицируемом средстве, а в случае недостижимости, выявление других приемлемых, определяемых возможным диапазоном изменения параметров и настроек вариантов адаптации.

Таким образом, разработанная методика и средства её осуществления позволяют осуществить достоверную всережимную верификацию с гарантированной приемлемой точностью на основе информации, эквивалентной натурным данным, получаемой от высокоадекватных средств моделирования ЭЭС.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание «Наука», проект №3901: «Разработка и исследование гибридной модели вставки несинхронной связи электроэнергетических систем».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kosterev D., Taylor C., Mittelstadt W. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage // IEEE Transactions on Power Systems. – 1999. - Vol. 14, No. 3. – P. 967–979.
2. Аюев Б.И. Верификация цифровых моделей ЕЭС/ОЭС / Б.И. Аюев, А.С. Герасимов, А.Х. Есипович, Ю.А. Куликов // Электричество. – 2008. – №5. - С. 2–7.
3. Kopsch D., Rudez U., Mihalic R. Applying a wide-area measurement system to validate the dynamic model of a part of European power system // Electric Power Systems Research. – 2015. – Vol. 119. - P. 1-10.
4. Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Принципы построения средств всережимного моделирования в реальном времени энергосистем // Электричество. – 2012. – № 6 – С. 10–13.
5. Гусев А.С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем // Известия Вузов. Проблемы энергетики. - 2008. - № 9.10/1. - С. 164–170.
6. Гусев А.С., Суворов А.А., Сулайманов А.О. Программно-технические средства всережимного моделирования в реальном времени управляемых шунтирующих реакторов в электроэнергетических системах // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/125-19879> (дата обращения: 18.08.2016).

Научный руководитель: А.С. Гусев, д.т.н., профессор, каф. ЭЭС ЭНИН ТПУ.