

О Т З Ы В

на автореферат диссертации Суворова Алексея Александровича
«Всережимная верификация средств моделирования электроэнергетических систем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»

Моделирование как установившихся, так и переходных режимов, является одним из важнейших направлений деятельности по осуществлению оперативно-диспетчерского управления энергосистемой, которое обеспечивает решение задач проверки допустимости, запасов устойчивости и надежности существующих или планируемых режимов и т.д.

В современных рыночных условиях, которые характеризуются множеством самостоятельных субъектов, функционирующих совместно в единой энергосистеме, но имеющих собственные интересы, требования к объективности и обоснованности решений, принимаемых системой оперативно-диспетчерского управления, значительно повысились. В связи с этим задачи создания достоверных цифровых динамических моделей энергосистем в специализированных программных комплексах и объективная оценка их адекватности играют важную роль в повышении эффективности управления энергосистемой для обеспечения ее системной надежности. С учетом сказанного актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Вместе с тем, после ознакомления с авторефератом и диссертацией возникает большое количество вопросов и замечаний:

1. Как следует из названия, диссертация посвящена верификации программно-вычислительных комплексов (ПВК). Вместе с тем, существуют различия между понятиями валидации, верификации и бенчмаркинга, которые четко разделяются как по сути, так и по цели. В данной работе смысл основополагающего для неё понятия «верификация» не раскрыт. Также автор не раскрывает способ применения понятия верификации по отношению к ПВК – не ясно, что именно в ПВК автор верифицирует. Так, в начале идет речь о проверке расчетных возможностей и численных проблемах интегрирования, характерных для ПВК, однако, в главе 4 диссертации разделы называются «верификация расчетов...», причем в самих этих разделах речь идёт о проверке моделей, используемых в различных ПВК. Это создает путаницу и подвергает сомнению подход автора к решению поставленной задачи.

2. Автором в диссертации используется терминология с неясным значением, а также ряд фраз, не характерных для научного и технического языка, которые встречаются только в узком исследовательском коллективе его коллег, например:

- гарантированная верификация;
- всережимная верификация;
- гарантированная приемлемая инструментальная погрешность;
- методически точное воспроизведение;
- непрерывное неявное параллельное методически точное интегрирование дифференциальных уравнений;
- эвристически очевидно;
- значимый спектр нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов;
- радикальное различие процессов;
- принципиальное различие процессов;
- коэффициент чувствительности генератора к изменению сети;
- принципиально и неприемлемо ограниченный;
- радикальная погрешность.

3. В диссертации приводятся теоретические доказательства того, что всережимная математическая модель любой реальной ЭЭС оказывается плохо обусловленной на ограничительных условиях применимости методов численного интегрирования. При этом констатируется, что единственным способом улучшения обусловленности является снижение жесткости и дифференциального порядка системы уравнений, а также ограничение интервала решения, реализуемые только путем значительных упрощений и ограничений. Для этого в существующих ПВК:

- реализуется декомпозиция единого и непрерывного спектра квазиустановившихся и переходных процессов в ЭЭС,
- используются, вместо трехфазных, в различной мере упрощенные однолинейные модели, обычно с предельным упрощением моделей электросетевых элементов,
- ограничивается интервал воспроизведения процессов.

Данное утверждение не совсем корректно. Так, использование в большинстве современных ПВК однолинейных моделей обусловлено, в первую очередь, упрощением процесса подготовки расчетной модели, а также простотой анализа получаемых результатов. При этом большинство современных ПВК позволяют, в том числе, использовать полноценные трехфазные модели (NETOMAC, Power Factory, ETAP, PSCAD, ...). При этом интервал воспроизведения процессов в указанных комплексах никак не ограничивается.

4. Автор во введении и первой главе диссертации использует множество ссылок на различные источники, при этом некорректным образом интерпретируя приведенные в них данные, а также вырывая из контекста отдельные фрагменты. Например:

- автор утверждает, что «упрощения и ограничения в совокупности с неопределимой методической ошибкой решения [дифференциальных уравнений численным методом] порождают неразрешимую в рамках методологически одностороннего сугубо численного подхода проблему полноты и достоверности такого моделирования». С данным утверждением нельзя не согласиться. На основе заключения, что все ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС наследуют данную неразрешимую проблему, автор делает вывод об актуальности и необходимости их верификации. Эта же проблема и ее причины, как отмечает автор, подтверждается сравнением результатов моделирования с натурными данными. При этом автор ссылается на результаты ряда работ по верификации цифровых моделей энергосистем [31-56] и выборочно приводит рисунки, иллюстрирующие существенное различие переходных процессов, полученных с использованием цифровой модели энергосистемы и записанных различными регистраторами аварийных событий. Однако, в данных источниках [31-56] отмечается, что указанное различие переходных процессов определяется, прежде всего, качеством рассматриваемых математических моделей основного электроэнергетического оборудования, а также полнотой и достоверностью данных об их фактических параметрах. При этом вопрос о программных или вычислительных проблемах непосредственно ПВК, применяемых в исследованиях, не поднимается. В этих же работах указывается и подтверждается соответствующими графиками, что актуализация моделей и их параметров позволяет обеспечить достоверное воспроизведение реальных переходных процессов;
- автор утверждает, что «актуальность и нерешенность проблемы верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС обозначены и в заключении экспертов IEEE» со ссылкой на [62]. Утверждение автора не подтверждается информацией в данном источнике. В этом источнике не делается выводов о том, что проблема воспроизведения каскадных аварий в крупных энергосистемах вызвана проблемами численного интегрирования или свойствами ПВК;

- утверждение автора, что «использование в многопроцессорных комплексах реального времени (RTDS [66, 67], Arene [68], Hypersim [69], Netomac [70], RT-LAB [71] и др.) всережимных математических моделей всего значимого оборудования приводит, по вышеуказанным причинам, к неприемлемому сокращению размерности моделируемой ЭЭС...» не соответствует действительности.

5. Утверждение автора в первой главе диссертации о том, что подход, основанный на верификации ПВК по натурным данным, не эффективен, поскольку использование данных по ограниченному количеству аварийных событий не может гарантировать совпадение результатов при возникновении другого аварийного события, свидетельствует о том, что автор смешивает понятия о достоверности используемых моделей элементов электроэнергетических систем в ПВК и достоверностью самого ПВК, связанной с «неопределимой методической ошибкой решения». Объединение этих понятий приводит к ложным выводам. Например, верификация самого ПВК, оценки его «неопределимой методической ошибки решения» и возможностей его использования для расчета длительных переходных процессов, может быть осуществлена по ряду тестовых примеров. Отдельно же могут быть верифицированы модели элементов электроэнергетических систем. Именно такой подход с разделением указанных понятий и используется на данный момент при создании и проверке корректности функционирования различных ПВК.

6. Концепция и методика всережимной верификации, а также все выводы, сделанные автором по результатам исследований, приведенных в четвертой главе диссертации, основаны на предположении о том, что МЭ – ВМК РВ ЭЭС допустимо использовать в качестве эталона. Однако, в диссертации приводится лишь один пример сравнения натурных осциллограмм с переходным процессом, полученным с помощью МЭ – ВМК РВ ЭЭС. В частности, представлено сопоставление процессов, полученных в МЭ – ВМК РВ ЭЭС, с записями РАС при однофазном КЗ на временном промежутке длительностью менее 1 сек. При этом погрешность результатов расчета существенно превышает заявленную инструментальную погрешность МЭ – ВМК РВ ЭЭС и достигает 9%. В остальном автор ограничивается фразой «Теоретически обоснованные и практически подтвержденные свойства и возможности исключают необходимость собственно его всережимной верификации...» и ссылается на источники [89-95]. К сожалению, ни в одном из указанных источников не приведены результаты полноценной всережимной верификации МЭ – ВМК РВ ЭЭС, основанной на сравнении с натурными осциллограммами.

7. Приведенная в главе 2 диссертации «Концепция всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС» имеет существенный недостаток: в пункте 2 «Концепции...» указано, что для проведения всережимной верификации «в верифицируемом ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС в рамках его возможностей и МЭ – ВМК РВ ЭЭС формируется идентичная по топологии, составу и параметрам оборудования моделируемая ЭЭС». Однако, для проведения корректной верификации необходимо также, чтобы режимы работы оборудования моделируемой ЭЭС (например, загрузка генераторов по активной и реактивной мощности) совпадали в верифицируемом ПВК и МЭ – ВМК РВ ЭЭС.

8. К методике всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, приведенной в главе 3 диссертации, имеются существенные замечания:

- методика не содержит назначения, области применимости;
- методика не содержит методической составляющей, а именно критериев верификации (критерии соответствия установленным требованиям) любого ПВК по данным, полученным в эталонном МЭ – ВМК РВ ЭЭС;
- из методики непонятно, в каких случаях ее надо и можно применять, а когда нет;
- не ясно, что свидетельствует о невозможности применения того или иного ПВК после выполнения процедуры верификации для решения тех или иных задач и т.д.

Представляется, что в данном виде предлагаемая методика не пригодна для практического использования.

9. Практическая часть работы (глава 4) также содержит очевидные методические ошибки, допущенные при проведении экспериментов и анализе их результатов. Например:

- в разделе «Верификация расчетов с помощью ПВК Eurostag предела статической аperiodической устойчивости ЭЭС» автор производит «оценку достоверности расчетов предела статической аperiodической устойчивости». Однако в данном разделе вообще не предоставлено данных по сравнению пределов статической аperiodической устойчивости. Не ясно, на каком основании автор считает полученный путем утяжеления в ПВК Eurostag и в МЭ – ВМК РВ ЭЭС режим предельным по статической аperiodической устойчивости;
- на рисунке 41 приведен процесс нарушения колебательной устойчивости в энергосистеме. Из рисунка видно, что имеются существенные отличия в исходном электрическом режиме для разных комплексов (различные углы δ). Также из рисунков видно, в ПВК Eurostag при возникновении возмущения (увеличение нагрузки) возникает затухающий колебательный процесс, а в эталонном МЭ – ВМК РВ ЭЭС сам момент возмущения и 50 секунд после него не сопровождается каким-либо колебательным процессом, а спустя 100 секунд наблюдается экспоненциальное нарастание амплитуды колебаний, в результате чего происходит нарушение устойчивости. Данный переходный процесс сложно объяснить с позиции базовых принципов теории управления и он нуждается в дополнительной интерпретации;
- на рисунках 42 и 43 приведены осциллограммы напряжения статора и напряжения возбуждения генератора для ПВК Eurostag и эталонного МЭ – ВМК РВ ЭЭС при моделировании КЗ в сети. Не понятно, каким образом автор сравнивает переходные процессы на этих рисунках и делает какие-то выводы, учитывая то, что период обновления значения сигнала на кривой изменения напряжения, полученной с эталонного МЭ – ВМК РВ ЭЭС составляет 1 секунду, а процесс снижения напряжения в ПВК Eurostag завершается за время порядка 150 мс?
- на рисунках 51 и 52 приведены осциллограммы напряжения статора генератора при КЗ в сети для ПВК Eurostag и эталонного МЭ – ВМК РВ ЭЭС. Автор комментирует, что «снижение напряжения статора генератора (рисунок 52) до идентичного значения на осциллограмме рисунка 51 происходит за 0,022 секунды». То есть автор концентрирует внимание на том, что в ПВК Eurostag напряжение статора при КЗ изменяется ступенчато, а в эталонном МЭ – ВМК РВ ЭЭС – плавно. Однако в данном случае происходит неправильная интерпретация осциллограммы. На рисунке 52 действующее значение напряжения снижается до 6,2 кВ не мгновенно только лишь благодаря эффекту задержки при расчете амплитуды синусоидального сигнала. На рисунке выше видно, что действующее значение напряжения статора на самом деле снижается почти ступенчатым образом до величины порядка 4.9 кВ амплитуды по всем фазам, что соответствует 6 кВ действующего значения. Плавное изменение действующего значения напряжения в эталонном МЭ – ВМК РВ ЭЭС связано лишь с осуществляемой фильтрацией сигнала;
- автор проводит сравнение с ПВК, имеющими заведомо отличающиеся модели электроэнергетического оборудования, в результате чего получает достаточно тривиальные результаты. Также автор провел сравнение результатов с RTDS, но только в простейшей схеме. Почему автор не провел сравнение с результатами, полученными в ПВК со схожими моделями оборудования, таких как Matlab Simulink, PSCAD и др.?

Имеющиеся вопросы и замечания к диссертационной работе Суворова Алексея Александровича свидетельствуют о низком качестве текста диссертации и иллюстративного материала, не позволяющем полноценно воспринять и оценить результаты проделанной работы. В связи с этим вынесение диссертационной работы на защиту представляется преждевременным.

Однако, учитывая большую работу, проделанную автором, считаем возможным присуждение Суворову Алексею Александровичу ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» в случае успешной защиты диссертационной работы.

Заместитель генерального директора
АО «НТЦ ЕЭС»,
кандидат технических наук, доцент

Герасимов Андрей Сергеевич

Заведующий отделом
электроэнергетических систем
АО «НТЦ ЕЭС»,
кандидат технических наук,

Смирнов Андрей Николаевич

Старший научный сотрудник
отдела электроэнергетических систем,
АО «НТЦ ЕЭС»,

Гуриков Олег Викторович

Подписи А.С. Герасимова, А.Н. Смирнова и О.В. Гурикова заверяю

Ба

Сведения о месте работы:

АО «Научно-технический центр Единой энергетической системы»
194223, г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д. 1, лит. А.

Тел.: (812) 292-94-65, e-mail: gerasimov_a@ntcees.ru;

Тел.: (812) 292-94-54, e-mail: smirnov_a@ntcees.ru;

Тел.: (812) 292-94-14 доб. 243, e-mail: gurikov_o@ntcees.ru