



PS5 – S2-06



Повышение устойчивости ЭЭС с применением территориально распределенных измерений

Х. КАНГ, М. БАЗАРГАН, К. МАЙКОК
ALSTOM Grid
Великобритания
harmeet.kang@alstom.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

WAM, WAC, устойчивость ЭЭС, векторный регистратор (PMU), гашение колебаний мощности (POD).

1 ВВЕДЕНИЕ

В докладе рассмотрены вопросы применения векторных регистраторов (PMU) для нужд управления режимом электроэнергетической системы (ЭЭС), реализации защит и повышения стабильности ЭЭС. Синхронизированные векторные измерения появились сравнительно недавно, а приложения на их основе сейчас только развиваются по всему миру. Основной проблемой, с которой сталкиваются при разработке указанных приложений, является недостаток опыта работы с данными от устройств PMU. С этой точки зрения интересен вопрос создания и последующего проведения исследований на программно-аппаратном комплексе, который может объединить элементы ЭЭС и комплекс сбора векторных измерений (включая каналы связи (КС)).

Во второй главе доклада рассматривается подобный программно-аппаратный комплекс, который был создан на базе устройства моделирования ЭЭС в реальном времени для разработки решений и их исследования при различных условиях.

В третьей главе доклада рассмотрены испытательные модели, которые были разработаны, и тип PMU, примененный для анализа проблем устойчивости. Выделены результаты исследований. В процессе исследования применялся модальный анализ для оценки малых колебаний и определения условий асинхронного режима.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ PMU. ПРОГРАММНО АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ.

Устройство моделирования в реальном времени Opal-RT™, проводящее расчеты моделей Simulink® в реальном времени, была модернизирована для реализации среды, которая может быть использована как опытный образец с обратной связью (с возможностью получения управляющих воздействий (УВ) извне). На рисунке 1 представлена система, которая позволяет использовать концентратор векторных измерений (PDC) как часть испытательной среды.

Разработка стандарта IEEE C37.118 для передачи данных от устройств PMU открывает возможности применения программного обеспечения на базе EMS и таким образом введения визуализации в процессе моделирования.

Векторный регистратор интегрирован прямо в устройство моделирования и поддерживает стандарт C37.118, выдавая данные напрямую через Ethernet порт. Данное решение позволило отказаться от дополнительного усилительного оборудования, преобразующего цифровой сигнал в аналоговый, и от самих устройств PMU, предоставляя при

этом возможность быстрого и простого изменения характеристик PMU (параметров фильтрации и постоянных запаздывания) и возможность подачи управляющих воздействий от внешних устройств в модель непосредственно в процессе расчета. Также реализованы дополнительные ограничения, связанные, например, с аппаратной установкой частоты, моделирования потери данных и т.д.

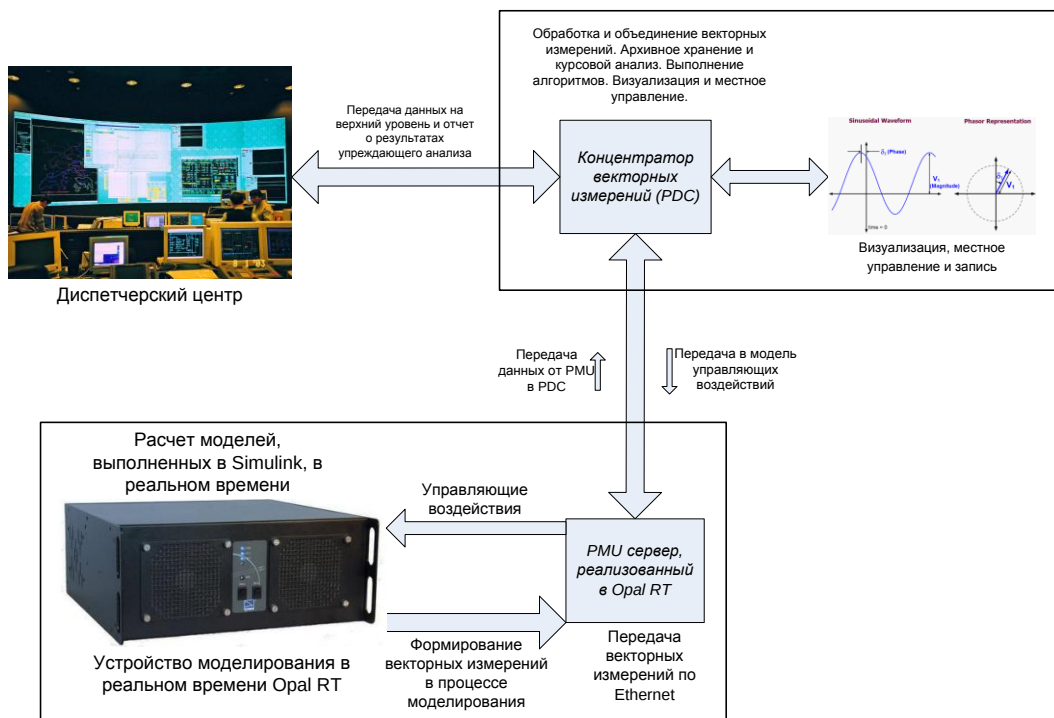


Рис. 1: Моделирование PMU с возможностью получения внешних УВ

3 ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ.

3.1 Устойчивость при малых отклонениях режима.

Вопрос оценки устойчивости при малых отклонениях параметра режима подробно описан в [4], однако в случае учета динамических изменений оценка несколько усложняется. Колебания параметров режима в ЭЭС обычно возникают после коротких замыканий или коммутаций в сети, вызывающих переходный процесс, и в целом приписываются взаимодействию между автоматическими системами управления.

На рисунке 2 представлены примеры затухающих и нарастающих гармонических колебаний с полюсами, отмеченными на комплексной плоскости.

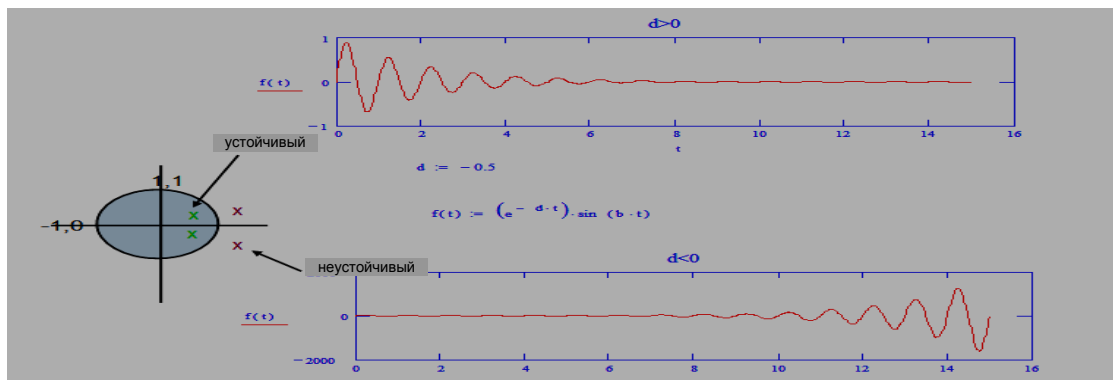


Рис. 2: Затухающие и нарастающие гармонические колебания с полюсами, отмеченными на комплексной плоскости

Частоты колебаний в системе в общем случае представляют собой комплексные величины, определяемые с применением характеристических чисел матрицы. Если указанные комплексные частоты отметить на комплексной плоскости, тогда точки, соответствующие полюсам частот быстро затухающих колебаний, будут расположены внутри окружности, а точки, соответствующие неустойчивым колебаниям, будут лежать вне окружности.

Для подтверждения правильности модального анализа, основанного на PMU, и возможности применения векторных измерений при оценке устойчивости была рассмотрена модель, описанная в [2]. Указанная модель была модернизирована путем включения в нее модулей PMU и возможности деления ЭЭС на две несинхронно работающие части с помощью выключателей.

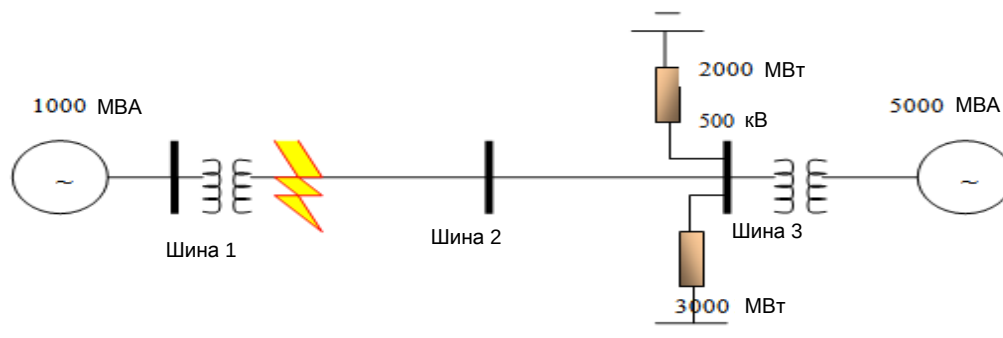


Рис. 3: Модель, применяемая для наблюдения за колебаниями режима (в соответствии с [2])

3.2 Контроль колебаний режимных параметров ЭЭС. Устойчивость ЭЭС.

Смоделирована классическая двухмашинная схема. В указанной схеме представлена нагрузка в 5000 МВт, подключенная к шине 3, при этом 4000 МВт из 5000 МВт нагрузка получает от генератора, подключенного непосредственно к шине 3. Натуральная мощность линии, связывающей две системы, составляет 1000 МВт. К схеме приложено возмущение в виде однофазного КЗ длительностью 0,1 с (после 100 мс происходит ликвидация КЗ). После ликвидации КЗ наблюдается возникновение колебаний мощности, передаваемой по линии, которые быстро гасятся регулятором мощности.

Как видно на рис. 4, система обладает хорошими демпфирующими свойствами, и регулятор мощности гасит все колебания, возникающие после аварии.

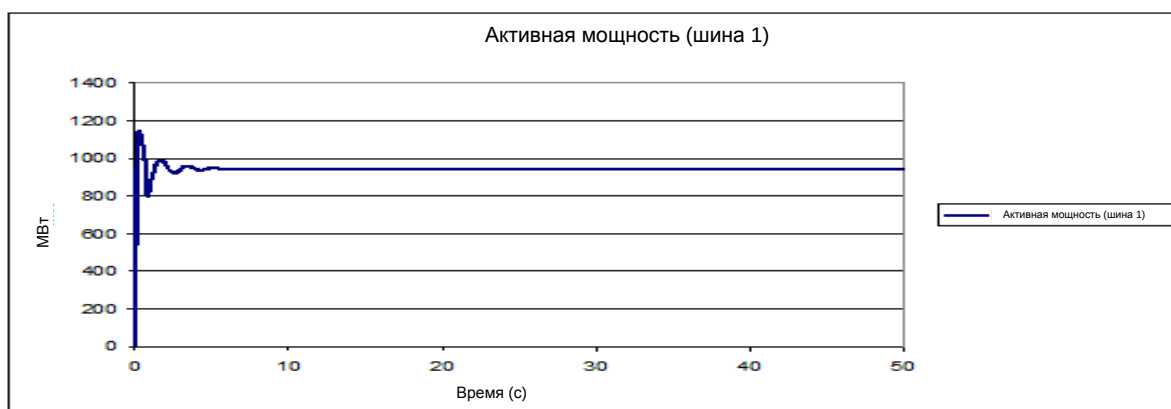


Рис. 4: Колебания активной мощности, измеренной на шине 1 после ликвидации КЗ

Модальный анализ, реализованный на базе данных от устройства PMU, расположенного на шине 1, указывает на гашение колебаний на частоте 0,58 Гц, возникающих сразу после ликвидации аварии, и наличие продолжительных колебаний с частотой 0,027 Гц. Полученные результаты близки к частотам, указанным для рассматриваемой схемы, в [2] (0,6 и 0,025 Гц соответственно).

Сказанное выше проиллюстрировано на рис. 5 и 6, где представлены осциллограммы коэффициента демпфирования (желтая линия) и частоты (красная линия) в Гц для двух мод. Коэффициент демпфирования для моды с частотой $f=0,58$ Гц достаточно велик и мало изменяется во времени (около 21%), но для моды с $f=0,027$ Гц очевидно, что величина коэффициента непостоянна и преимущественно стремится к нулю (рис. 6). Существенные изменения в коэффициенте демпфирования для второй моды преимущественно вызваны малой амплитудой рассматриваемой гармоники. Однако, если перейти на комплексную плоскость (рис. 7), то картина станет значительно более наглядной.

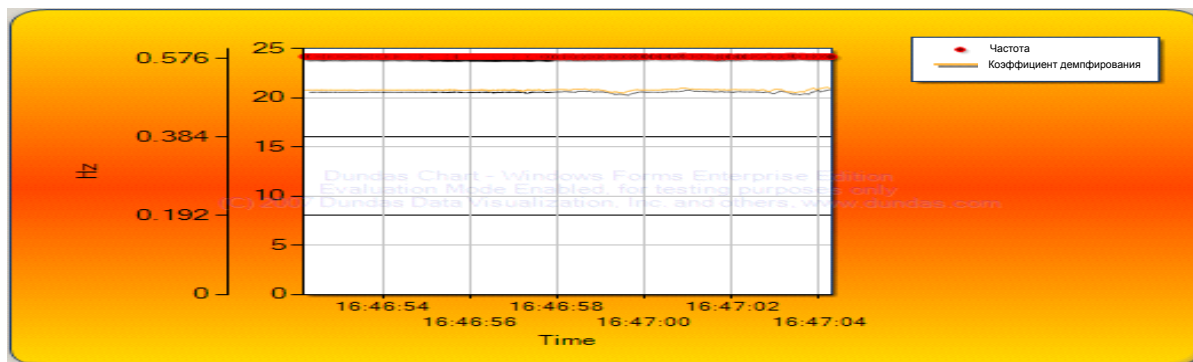


Рис. 5: Модальный анализ показывает наличие существенного коэффициента демпфирования на моде с частотой 0,58 Гц

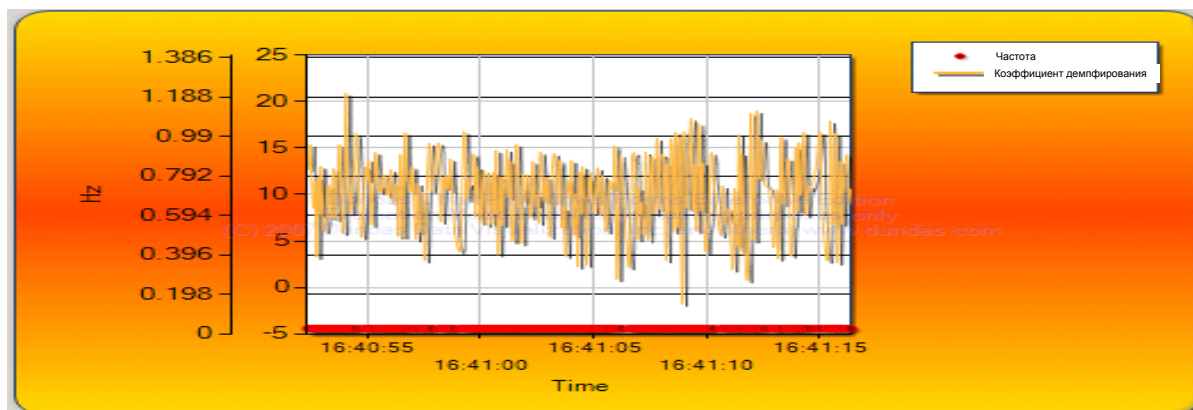


Рис. 6: Модальный анализ указывает на наличие колебаний с частотой 0,027 Гц

Рассмотрим отображение характеристических векторов двух мод на комплексной плоскости. Для моды с частотой 0,58 Гц точки лежат внутри окружности, однако для моды с частотой 0,027 Гц точки расположены прямо на окружности, что указывает на квазиустановившийся режим, в котором колебания будут постоянными. Из сказанного выше следует, что регуляторы, реализованные в рассматриваемой ЭЭС, требуют модернизации, направленной на гашение межсистемных колебаний на выявленной частоте.

3.3 Гашение колебаний с применением HVDC.

Для исследования разработана модель, включающая две ЭЭС, соединенные параллельными линиями постоянного и переменного тока. Обе ЭЭС (рис. 8) представляют из себя соединение мощного генератора, моделирующего идеальный источник, и генераторов мощностью 150 МВт (ЭЭС1) и 500 МВт (ЭЭС2). Передача мощности происходит от ЭЭС1 к ЭЭС2.

Для исследования в модели применяется стандартный 12-ти импульсный управляемый тиристорный преобразователь.

Фильтры и трансформаторы преобразователя также включены в модель.

На рис. 8 представлена модель, реализованная в программной среде Simulink®.

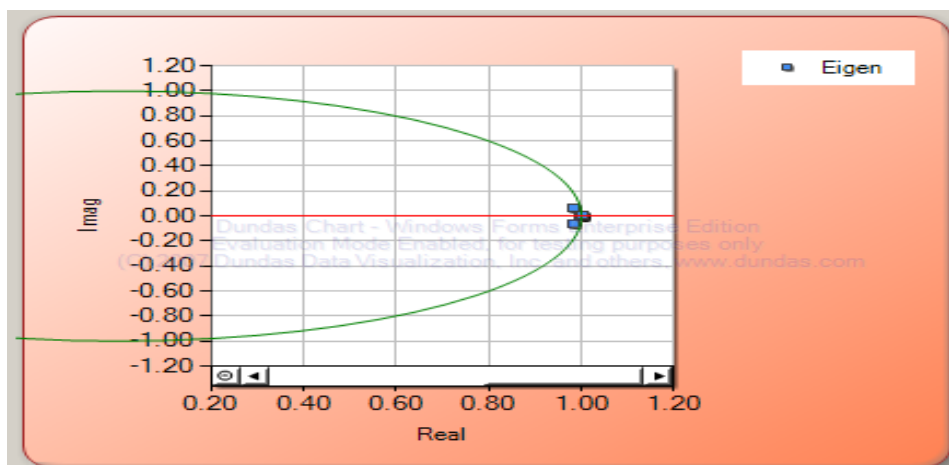


Рис. 7: Отображение концов характеристических векторов на комплексной плоскости для мод с частотами 0,58 и 0,027 Гц

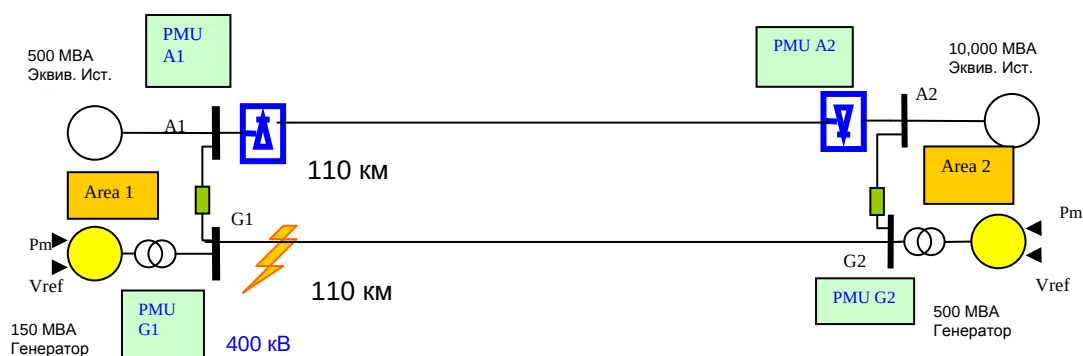


Рис. 8: Модель для исследования гашения колебаний с применением HVDC

После достижения ЭЭС, представленной на рис. 8, установившегося режима происходит однофазное КЗ в фазе А длительностью 100 мс у шины G1, ликвидируемое отключением линии переменного тока.

На рис. 9 представлен эффект от введения в систему регулятора, обеспечивающего гашение колебаний. На графике представлена временная зависимость изменения активной мощности, проходящей через шину A1, для случая отсутствия гашения колебаний, традиционных решений в части гашения колебаний и алгоритма гашения колебаний, реализованного на базе информации от устройств PMU, установленных на шинах A1 и A2. График, обозначенный как «Без POD», показывает колебания передаваемой мощности при условии отсутствия гашения колебаний. График, обозначенный как «с POD», показывает колебания мощности при применении стандартных алгоритмов гашения колебаний. График, обозначенный как «PMU POD», показывает колебания мощности для случая, когда информация от устройств PMU, установленных на шинах A1 и A2, применяется для формирования регулятором гашения колебаний управляющих воздействий.

Как и ожидалось применение гашения колебаний мощности оказывает положительный эффект на качание мощности. При этом отмечен ряд отличий в работе традиционных регуляторов гашения колебаний и регуляторов, основанных на данных PMU. Хотя измерения для алгоритмов производились в одних точках (шины A1 и A2).

Традиционный регулятор гашения колебаний быстрее реагирует на изменение контролируемых параметров, так как основывается на мгновенных измерениях, в то время как регуляторы на базе измерений PMU получают новую информацию не чаще одного раза за период промышленной частоты (максимальное число передаваемых за секунду выборок не более 50).

Таким образом, очевидно, что традиционные регуляторы гашения колебаний более чувствительны к переходным режимам по сравнению с регуляторами на базе измерений PMU. Однако работа объединенного регулятора, включающего оба решения, в опытах, представленных выше, не была отражена.

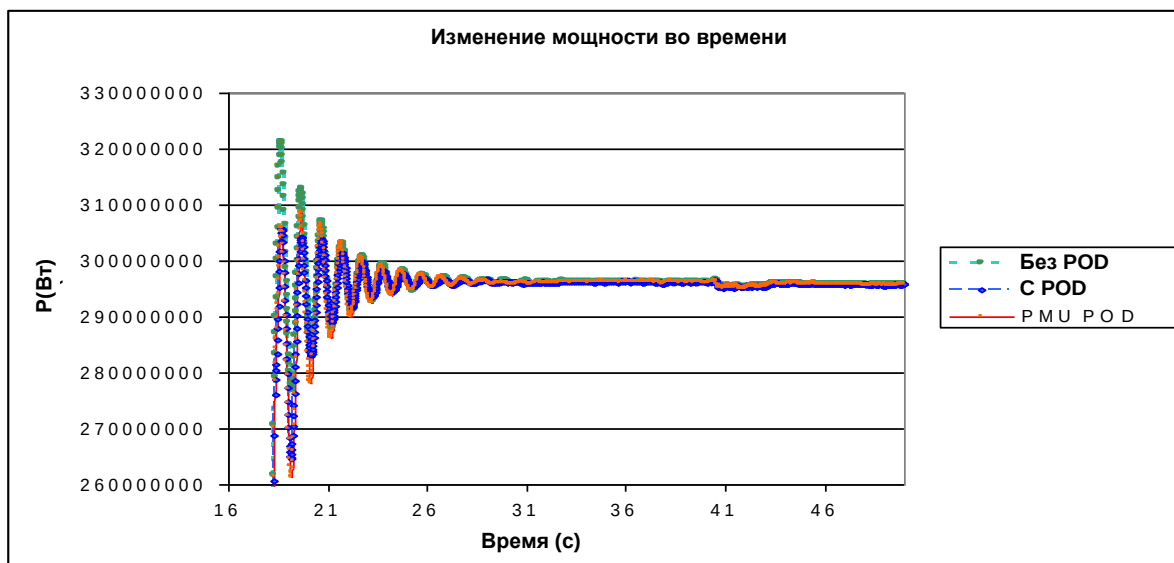


Рис. 9: Активная мощность (шина A1)

Так как связь, объединяющая шины A1 и G1, имеет относительно малое сопротивление ($0.2+j1.88$ Ом), решено реализовать принцип усредненного угла для систем ЭЭС1 и ЭЭС2, применяемых для формирования управляющего воздействия функции гашения колебаний.

Предложен новый регулятор, основанный на данных от PMU (A1, G1, A2, G2). Выходной управляющий сигнал от указанного регулятора объединен с управляющим сигналом традиционного регулятора гашения колебаний. Указанное решение основано на предположении, что основной вклад в возникающие колебания в объединенной ЭЭС вносят генераторы G1 и G2.

На рис. 10 представлены результаты моделирования в сравнении с применением традиционного регулятора гашения колебаний. На графике, обозначенном как «С POD+PMU+Gen», представлены колебания мощности после возмущений при применении гашения колебаний, основанного на объединении традиционного регулятора с регулятором, работающим на базе данных от PMU, установленных на шинах G1 и G2, объединенных с информацией от PMU, установленных на шинах, подключенных к линии постоянного тока (HVDC). Анализ графика (см. рис. 10) показал, что колебания мощности в первые секунды после возмущения для обеих представленных функций более или менее идентичны. Это доказывает, что объединение традиционных каналов регулирования с каналами, применяющими данные от PMU, не приводит к возникновению отрицательных эффектов.

Далее был проведен дальнейший анализ для оценки поведения систем. На рис. 11а представлен график изменения мощности во времени начиная с 43-ей секунды моделирования (т. е. 15 секунд спустя отключения линии). На графике наблюдаются незначительные колебания (не более одного мегаватта) вызванные запаздыванием ряда регуляторов генераторов и их взаимодействием с остальной системой.

3.3.1 Подробный анализ

Хотя приведенные выше графики наглядно доказывают эффективность гашения колебания, был проведен дальнейший анализ для определения природы полученных результатов. Для этих целей проанализированы данные с устройства PMU, установленного на шине A1. Шина A1 выбрана по причине ее подключения к линии постоянного тока (HVDC) и получении на ней наиболее наглядных результатов по сравнению с шиной A2.

В процессе анализа главным образом выявлялись различия в работе традиционных и нового объединенного алгоритмов гашения колебаний.

Рис. 11б подтверждает необходимость гашения колебаний особенно для генератора 1.

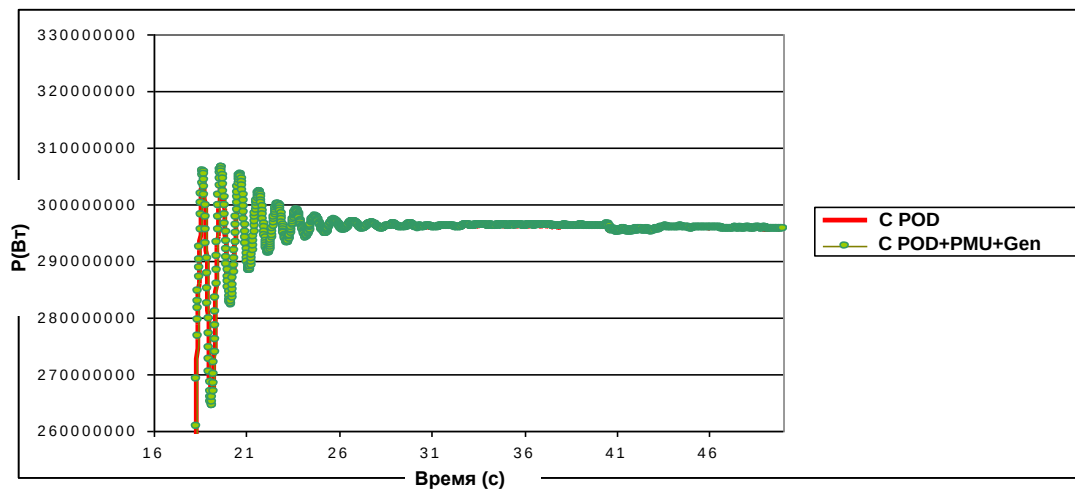


Рис. 10: Активная мощность (шина A1) при применении традиционного и объединенного алгоритмов гашения колебаний для регулятора

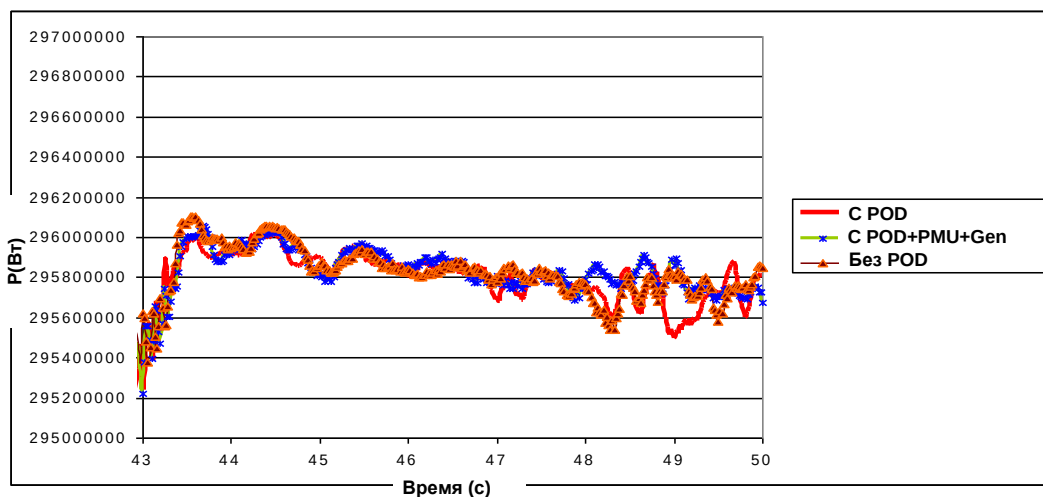


Рис. 11а: Активная мощность (шина A1) при применении традиционного и объединенного алгоритмов гашения колебаний для регулятора (приближение)

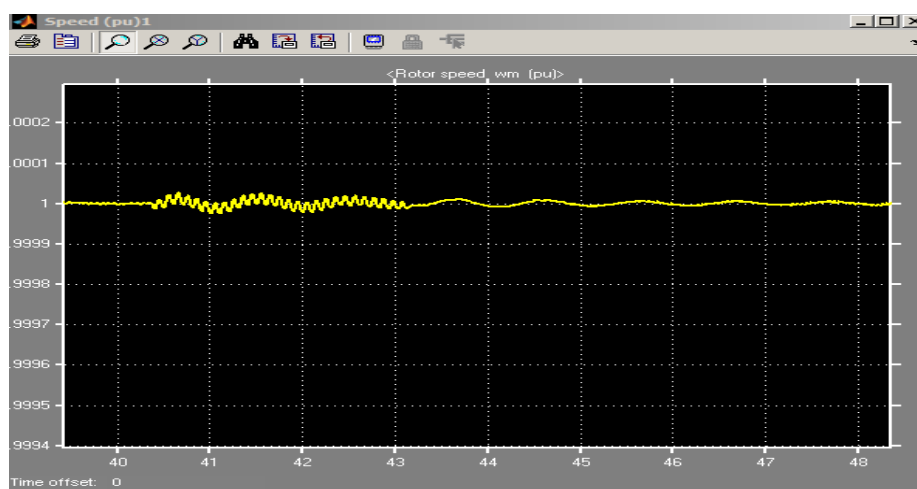


Рис. 11б: Скорость вращения ротора генератора 1 в о.е. в случае отсутствия регуляторов гашения колебаний.

Для дальнейшего анализа характеристические числа матрицы системы были представлены на плоскости Z (рис. 12). Для повышения наглядности на рисунке представлены только полюсы одного вектора. Полюса второго вектора имеет зеркальное относительно мнимой оси изображение.

Смещение от границ окружности внутрь по действительной оси особенно заметное в правой части графика указывает на улучшение демпфирующих свойств системы. Отдельные случайные точки допустимо не рассматривать, так как они соответствуют переходным режимам, но совокупность характеристических чисел матрицы указывает на формирование с течением времени более устойчивого режима.

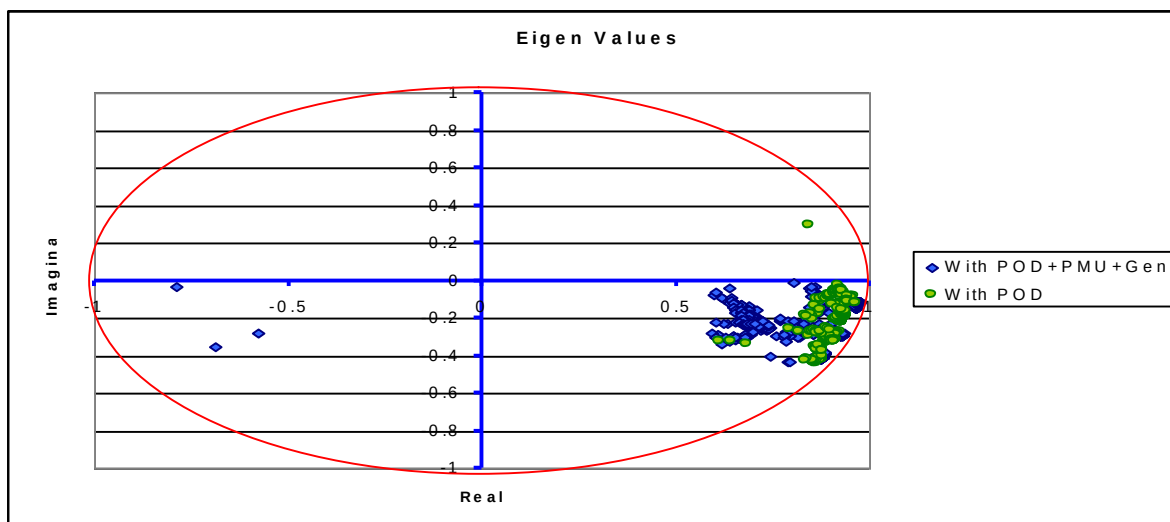


Рис. 12: Представление характеристических чисел матрицы на комплексной плоскости (на момент времени, соответствующий 43-ей секунде моделирования)

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что программно аппаратный комплекс, формирующий объединенную расчетную среду, является уникальным средством для исследования и понимания основных свойств данных от устройств PMU с учетом особенностей работы ЭЭС.

Исследованы с применением моделирования два вопроса, связанные с информацией, предоставляемой устройствами PMU: оценка устойчивости работы системы при малых возмущениях и гашение колебаний с применением HVDC. Результаты исследования предложенных методов применения данных от PMU подтвердили свою работоспособность и пригодность подобных данных, в том числе и на достоверных моделях ЭЭС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. F. Hauer, et al "Initial Results in Prony Analysis of Power system response signals" IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, No. 1, pp. 80-89, Feb 1990.
- [2] Matlab SVC and PSS Model, Gilbert Sybille (Hydro-Québec).
- [3] E, Palmer "The Use of Prony Analysis to Determine the Parameters of Large Power System Oscillations"- Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference 2002, 29 September - 2 October 2002, Melbourne, Australia.
- [4] Electric Power Engineering Handbook – Chapter 11, Power System Dynamics and Stability.