

Спектральные методы в задачах анализа устойчивости энергосистем и диагностики состояния оборудования

Ядыкин Игорь Борисович
Искаков Алексей Борисович

V.A.Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia



26 Июня 2018, Семинар D2 РНК СИГРЕ, Москва

Мотивация

- **Постановление Правительства РФ 1401** “О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателе” от 14 декабря 2016 г.
- Обеспечить разработку **автоматизированной системы мониторинга и комплексного расчета показателей** технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства
- **Рекомендации СИГРЕ** по тематике исследований в электроэнергетике.
- **Надежность**: оценка и мониторинг технического состояния, критерий остаточного ресурса, способы продления срока службы
- **Контроль устойчивости энергосистем**, особенно в отношении систем регулирования частоты и напряжения источников энергии на базе преобразователей, включая их моделирование и эффективность, а также вопросы последовательной компенсации и **воздействия микросетей**.
- **Информационно-коммуникационные технологии** для управления активами и технического обслуживания.

Основная идея предлагаемого метода: спектральные разложения Грамианов

Уравнение Ляпунова: $A^*P + PA = -Q$, $Q = Q^T > 0$

Теорема. Пусть A имеет простой спектр $\sigma(A)$ такой что $\lambda_k + \lambda_l \neq 0$ для всех $\lambda_k, \lambda_l \in \sigma(A)$. Тогда P представляется как сумма эрмитовых матриц (субграмианов), соответствующих либо отдельным собственным числам, либо их парным комбинациям:

$$P = \sum_{k=1}^n P_k = \sum_{k,l=1}^n \hat{P}_{kl}, \text{ где}$$

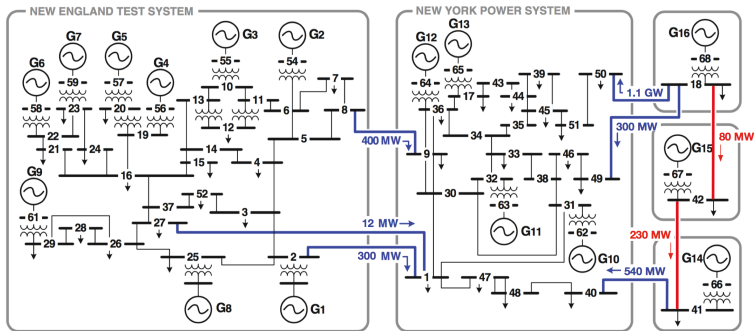
$$P_k \equiv \frac{1}{2} \left(\tilde{P}_k + (\tilde{P}_k)^* \right), \quad \hat{P}_{kl} \equiv \frac{1}{2} \left(\tilde{P}_{kl} + (\tilde{P}_{kl})^* \right),$$
$$\tilde{P}_{kl} = \frac{-1}{\lambda_k^* + \lambda_l} \cdot \text{Res} \left((\lambda I - A^*)^{-1}, \lambda_k^* \right) \times Q \times \text{Res} \left((\lambda I - A)^{-1}, \lambda_l \right),$$
$$\tilde{P}_k = -(\lambda_k I + A^*)^{-1} \times Q \times \text{Res} \left((\lambda I - A)^{-1}, \lambda_k \right)$$

$\text{Res} \left((\lambda I - A)^{-1}, \lambda_l \right)$ и $\text{Res} \left((\lambda I - A^*)^{-1}, \lambda_k^* \right)$ вычеты соответствующих матричных резольвент в $\lambda = \lambda_l$ и $\lambda = \lambda_k^*$

Ожидаемые преимущества метода

	Анализ соб. чисел	Анализ субграмианов
Количественный критерий приемлемого риска	Минимально приемлемое демпфирование	Максимально приемлемое возмущение энергии в группе слабоустойчивых мод (сумма норм соотв. субграмианов)
Критический коэффициент демпфирования	Выбирается эмпирически	Настраивается адаптивно. Увеличивается при увеличении резонансных взаимодействий
Учёт резонансных взаимодействий между модами	НЕТ (или эмпирически)	ДА
Количественная мера взаимодействия между модами	НЕТ	ДА (Используя нормы парных субграмианов)
Возможность учёта в критерии входной и выходной матриц B и C	НЕТ	ДА (Критерий может учитывать географ. удалённость районов)
Автоматическая настройка критерия в нестационарных системах с непредсказуемым изменением соб. чисел	НЕТ	ДА

1. Оценка взаимодействия мод субграминами

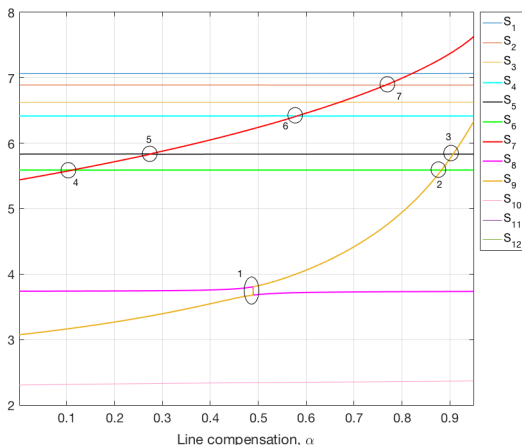


В схеме IEEE-68 (5 географических регионов, >10 межрайонных колебаний)

С помощью Тиристорного продольного компенсатора (TCSC) изменяется импеданс двух ключевых линий передачи с целью регуляции потоков

мощности: $X = X_0(1 - \alpha)$, $0 < \alpha < 0.95$

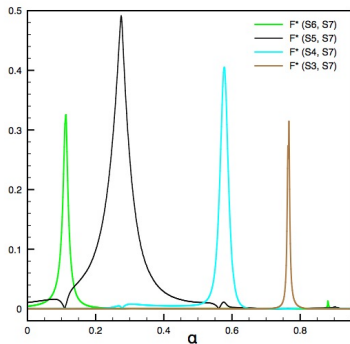
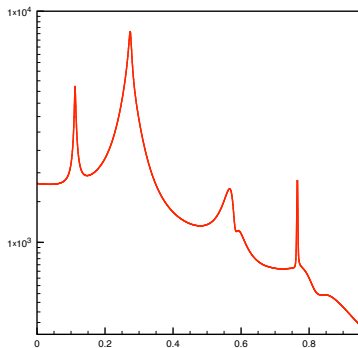
Анализ собственных чисел



Траектории частот колебательных мод в зависимости от α
Две межрайонные колебательные моды (красная и оранжевая)
двигаются и взаимодействуют с другими модами.

Анализ норм субграмианов

Субграмиан красной моды и её парные субграмианы с другими модами

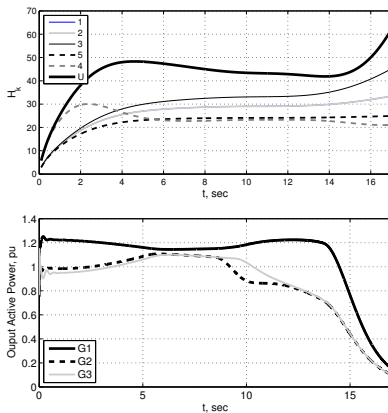


Субграмианы надёжно **идентифицируют резонансные взаимодействия** мод.

Они имеют **физическую интерпретацию**: показывают величину энергии возмущений, аккумулируемую как в отдельных модах, так и в их парных взаимодействиях.

2. Прогноз устойчивости электросети субграмианами

Разложение на субграмианы во времени использовано для **анализа развития неустойчивости**, возникающей в модели реальной электросети на острове Русский при её отсоединении от материковой сети.



Сверху: собственные составляющие $\|H\|_2^2(t_0, t)$ вычисленные в момент t_0 .

Снизу: фактическое поведение активной мощности генераторов.

Диагностика состояния оборудования

Диагностика и прогноз технического состояния электроэнергетической системы на основе метода грамианов включает информацию **о структуре и параметрах математической модели объекта**, полученной на этапе планирования режимов, паспортных данных оборудования и/ или применения методов идентификации на основе технологических архивов или измерения состояния системы в реальном времени.

Применения принципа эталонной модели для диагностики и прогноза технического состояния физической системы хорошо известно. **Что дает применение в рамках этого подхода использование субграмианов?**

- Построение дерева возможных отказов на графе модели,
- Оценка риска внезапного отказа оборудования на основе оценки энергетического функционала, связанного с каждой вершиной графа модели и с их взаимодействием,
- Оценка риска деградационного отказа оборудования на основе оценки группы доминирующих энергетических функционалов, связанных с группой вершин графа модели оборудования.

Цифровые технологии и метод грамианов

- Метод грамианов к настоящему времени разработан для математических моделей **дискретных линейных и частично билинейных динамических систем** во временной и частотной области с одним и/или многими входами, что позволяет использовать современные информационно-телекоммуникационные технологии для его реализации в различных приложениях в энергетике, интеллектуальных транспортных системах, робототехнике и даже в медицине.
- Для вычисления спектральных разложений грамианов существуют **быстрые алгоритмы**, позволяющие вычислять энергетические показатели для критической части спектра **в режиме реального времени**.
- Программное обеспечение для решения уравнений Ляпунова большой размерности в настоящее время успешно решает задачи с матрицами динамики **размерностью в десятки тысяч** (LAPACK, SIMULINK). Это позволяет развивать цифровые технологии мониторинга диагностики и прогноза технического состояния оборудования. С технологией СМПП это открывает возможность разрабатывать и создавать **автоматизированные системы мониторинга технического состояния ЭЭС**.

Перспективные приложения (I)

Принцип **выявления аномалий в балансе энергии между устройствами** (и/или системами, состоящими из этих устройств), который основан на мониторинге изменения энергии, накопленной в данном устройстве, является ключевым в методе грамианов. Этот принцип работает для технических систем различной природы, допускающих описание в виде стандартной математической модели.

- Он может быть применён для вычисления риска **потери устойчивости** электроэнергетической системы и выявления **критических сечений сети** и потенциальных **центров качаний**, грозящих наступлением каскадной аварии. В этом случае аномалия связана с накоплением энергии в слабоустойчивых модах, порождаемых источниками угрозы.
- Этот принцип можно также применить для решения задачи **технической диагностики оборудования**, в которой аномалия баланса связана с деградационным износом оборудования или его внезапным отказом. Мониторинг баланса энергии на основе метода грамианов прямо связан с оценкой энергоэффективности оборудования.

Перспективные приложения (II)

На основе развитой теории будут предложены **новые технологии адаптивного мониторинга и управления** электроэнергетической системой (ЭЭС), в частности для решения следующих задач:

- Оценка **запасов статической устойчивости** ЭЭС, выделение опасных межрайонных колебаний и количественная оценка их взаимодействия.
- Выявление **доминирующих центров качаний** и соответствующих им критических “коридоров” на графе сети, а также предсказание устойчивости этих качаний в режиме реального времени.
- Выявление **деградационных отказов и прогноз ресурса** электромеханического оборудования на основе нарушения “энергетического” баланса между отдельными узлами или устройствами в сети.
- Выбор оптимального **расположения системных регуляторов** на графе ЭЭС.
- Определение **оптимального потокораспределения** в сети на основе “энергетических” критериев.
- **Балансирование генерации и потребления** в сети в режиме реального времени.