

Спектральные методы оценки и прогноза технического состояния электрических, электрохимических и механических систем

И.Б. Ядыкин
(Лаборатории 19, 24, 38, 41)



3 Апреля 2017, ИПУ РАН, Москва

Матричные уравнения в математической теории систем

- **Основоположники:** Sylvester J. (1884) Sur l'équation en matrices $p\dot{x}=xq$; Ляпунов А.М. (1893) Общая задача об устойчивости движения.
- **Развитие аналитических и численных методов решения:** Talbot A. (1959), Bartels R.H. и Steward G.W. (1972), P. Lancaster (1970), Далецкий Ю.Л. и Крейн М.Г.(1970), Икрамов Х.Д.(1984), Годунов С.К.(1997).
Учебники и обзоры: Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление (2002); Демиденко Г.В. Матричные уравнения (2009); Simonchini V. Computational methods for Linear Matrix Equations. SIAM Review 58(3), 377-441 (2014).
Бойченко В.А., Курдюков А.П. и др. Некоторые методы синтеза регуляторов заданного порядка и заданной структуры. "Управление большими системами" М: Изд. ИПУ РАН. Вып.19, 23-126 (2007)
- **Расширение физических приложений:** Решения уравнений Ляпунова обобщены на случай **нестационарных систем** (Shokoohi et.al. 1983, Verriest and Kailath 1983), а также **билинейных и стохастических систем** под наименованием **энергетических функционалов** (Scherpen 1993, Gray and Mesko 1998, Benner and Damm 2011). Обобщения для **систем с запаздыванием** смотри в (Kharitonov, Time-Delay Systems: Lyapunov functionals and Matrices. New York: Springer (2013)).

Спектральные методы в задачах анализа устойчивости и диагностики

- **Спектральный анализ измеряемых сигналов:** классические и параметрические методы идентификации (обзор методов будет позже).
- **Модальный анализ:** обнаружение и анализ критических мод. Коэффициенты участия позволяют анализировать соотношение между переменными и собственными числами (Pagola et al. 1989; Pérez-Arriaga et al. 1990; Abed et al. 2000; Garofalo et al. 2002).
- **Селективный модальный анализ.** Вычисляет только "слабо устойчивые" собственные числа и моды: модифицированный метод Арнольди (Arnoldi 1951, Kundur et al. 1990), доминирующих полюсов (Martins 1997), метод матричных сигнум-функций (Мисриханов, Рябченко 2008).
- **Вейвлет-анализ и его применение для идентификации** (Grossman, Morlet 1984; Ghanem, Romeo 2001); анализ собственных частот (Kijewski, Kareem 2003; Ruzzene et al. 1997; Vána 2011); биортогональные вейвлеты (Но 2003); вейвлет-фреймы (Sureshababu 1999); вейвлет-сети (Shi 2005)
- **Спектральные разложения H_2 нормы передаточной функции** для аппроксимации больших динамических систем (Antoulas 2005).
- В (Ядыкин 2010, Yadykin et al. 2014) **спектральные разложения применены к энергетическим функционалам** для анализа устойчивости.

Спектральные разложения Грамианов

(Ядыкин И.Б. (2010), Автоматика и телемеханика, №6, 39–50

Yadykin I.B. et al. (2014), Int. J. Robust Nonlin., 24(8-9), 1361–1379)

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:

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

$$P_k \equiv \frac{1}{2} (\tilde{P}_k + (\tilde{P}_k)^*), \quad \hat{P}_{kl} \equiv \frac{1}{2} (\tilde{P}_{kl} + (\tilde{P}_{kl})^*),$$

$$\tilde{P}_{kl} = \frac{-1}{\lambda_k^* + \lambda_l} \cdot \text{Res}((\lambda I - A^*)^{-1}, \lambda_k^*) \times Q \times \text{Res}((\lambda I - A)^{-1}, \lambda_l),$$

$$\tilde{P}_k = -(\lambda_k I + A^*)^{-1} \times Q \times \text{Res}((\lambda I - A)^{-1}, \lambda_k)$$

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

Разложения конечных Грамианов

Для нестационарных или неустойчивых систем бесконечные грамианы не существуют \Rightarrow чтобы анализировать устойчивость переходных процессов необходимы спектральные разложения конечных грамианов.

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

$$P(t) = P_0 + \sum_{k=1}^n P_k(t) = P_0 + \sum_{k,l=1}^n \hat{P}_{kl}(t), \text{ где}$$

$$P_k(t) = \sum_{l=1}^n \hat{P}_{kl}(t), \quad \hat{P}_{kl}(t) \equiv \frac{1}{2} \left(\tilde{P}_{kl}(t) + (\tilde{P}_{kl}(t))^* \right),$$

$$\tilde{P}_{kl}(t) = \frac{e^{(t-t_0)(\lambda_k^* + \lambda_l)} - 1}{\lambda_k^* + \lambda_l} \cdot \text{Res} \left((\lambda I - A^*)^{-1}, \lambda_k^* \right) \times \\ \times [AP_0 + P_0A^* + Q] \times \text{Res} \left((\lambda I - A)^{-1}, \lambda_l \right)$$

Конечные субграмианы: $P_k(t) \rightarrow P_k(\infty)$, $P_{kl}(t) \rightarrow P_{kl}(\infty)$, $t \rightarrow \infty$

Сравнение с другими спектральными методами

Сходство. Метод Субграмианов (МСГ) позволяет идентифицировать и локализовать собственные моды, опасные для устойчивости системы. Нормы субграмианов могут использоваться как мера близости к границе устойчивости (как и расстояние собственных чисел от мнимой оси). **Отличия:**

- **Физическая интерпретация.** Грамианы характеризуют вариацию энергии возмущения в системе \Rightarrow субграмианы характеризуют вклад собственных мод или их пар \Rightarrow более "тонкие и физичные" критерии устойчивости.
- МСГ по-разному оценивает собственные моды с одинаковыми коэффициентами затухания $Re(\lambda_i)$ но с разной энергией (благодаря их резонансному взаимодействию) \Rightarrow он позволяет **учитывать резонансные взаимодействия** между слабоустойчивыми низкочастотными колебаниями.
- **Разбиение на парные собственные части** \hat{P}_{kl} позволяет количественно оценивать взаимодействия между слабоустойчивыми модами. В других спектральных методах оценка парных комбинаций собственных мод не проводится.

Энергетический критерий устойчивости

Подобно собственным значениям, субграмианы можно использовать как меру близости к границе устойчивости.

Рассмотрим линейную систему в пространстве состояний и уравнение Ляпунова $A^*P + P A = -Q$, $Q = Q^T > 0$ Степень устойчивости γ можно оценить с помощью **неравенства Годунова**:

$$\gamma = |\max_k \operatorname{Re}(s_k)| \geq 1/(2 \cdot \|Q^{-1}\| \cdot \|P\|)$$

Выберем **энергетический критерий условной устойчивости** в виде

$$\|P\| \leq \sum_k \|P_k\| \leq \sum_{kl} \|\hat{P}_{kl}\| \leq P_{crit}$$

Отсюда получаем

$$\gamma \geq 1/(2 \|Q^{-1}\| \sum_k \|P_k\|) \geq 1/(2 \|Q^{-1}\| \sum_{kl} \|\hat{P}_{kl}\|) \geq 1/(2 \|Q^{-1}\| P_{crit})$$

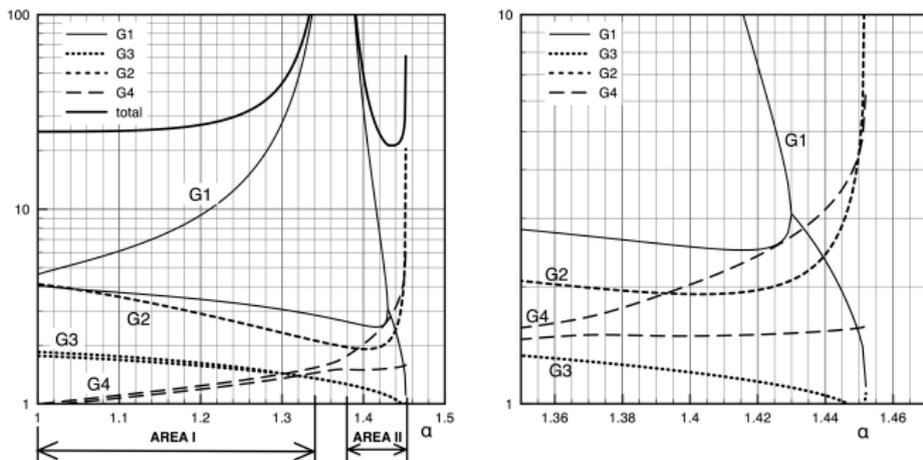
Эту оценку можно использовать для калибровки критерия

$$\text{Система устойчива} \Leftrightarrow \sum_{k \in \{\text{Weakly Stable}\}} \|P_k\| < +\infty$$

Оценка состояния электросети субграмианами

Двухрайонная схема Кундура [Yadykin I.B. et al., Int. J. Robust. Nonlin. (2014)]

Проанализировано взаимодействие слабо устойчивых мод в процессе развития неустойчивости. Анализ поведения норм субграмианов позволяет идентифицировать неустойчивости локальных электромеханических мод и межрайонных колебаний. Наблюдение за трендами отдельных субграмианов позволяет обнаруживать риск потери устойчивости раньше чем анализ полной энергии.



Поведение норм субграмианов при повышении параметра нагружения системы

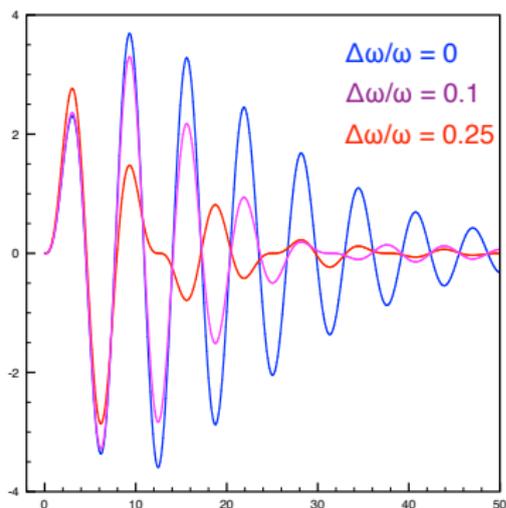
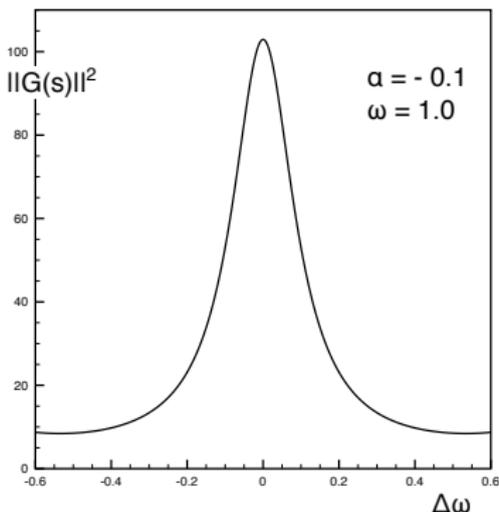
Отличие от модального анализа

=> В отличие от других методов модального анализа, субграмианы учитывают величину взаимодействия между слабо устойчивыми модами.

Пример: Два резонирующих осциллятора – низкочастотные биения

Рассмотрим $G(s) = \frac{1}{((s-\alpha)^2 + \omega_1^2)((s-\alpha)^2 + \omega_2^2)}$, где $\omega_1 = \omega - \Delta\omega$, $\omega_2 = \omega + \Delta\omega$.

Ниже мы меняем только $\Delta\omega$:

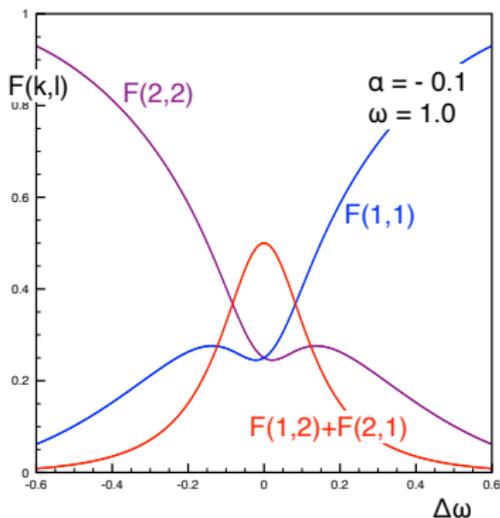


Отличие от модального анализа

=> В отличие от других методов модального анализа, парные субграмианы P_{kl} позволяют количественно оценить энергию взаимодействия между модами.

Пример: Два резонирующих осциллятора – низкочастотные биения

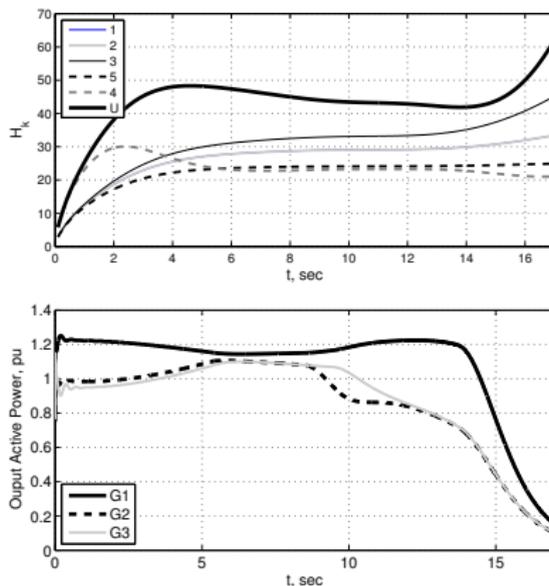
Доли энергетического участия $F(k, l) = \|P_{kl}\| / \sum_{kl} \|P_{kl}\|$ как функция $\Delta\omega$:



Прогноз состояния электросети субграмианами

Yadykin I.B. et al. (2015), IFAC PapersOnLine, 48(30), 548–553

Конечные субграмианы использованы для анализа развития неустойчивости, возникающей в модели Simulink 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.

Обобщение на дискретные системы: разложения матрицы ковариаций случайного процесса

Yadykin I.B., Doklady Mathematics, 93(3), 344-347 (2016)

Рассмотрим дискретный случайный процесс с устойчивой матрицей A

$$x(i+1) = Ax(i) + B_w w(i), \quad x(i_0) = x_0$$

где $w(i)$, $i = i_0, i_0 + 1, \dots$ – последовательность взаимно некоррелированных векторных стохастических величин с нулевыми математическими ожиданиями и матрицами дисперсий $V(i)$.

Тогда (Квакернак и Сиван, 1977)

$$m(i) = \Phi(i, i_0) m_0, \quad i > i_0$$
$$Q(i_0) = Q_0, \quad Q(i+1) = AQ(i)A^T + B_w V(i)B_w^T, \quad i = i_0, i_0 + 1, \dots$$

Спектральные разложения асимптотической матрицы дисперсий по комбинационному спектру матрицы A с простыми собственными числами z_μ имеет вид

$$Q = \sum_{\lambda=1}^n \sum_{\mu=1}^n \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{1}{1-z_\lambda z_\mu^*} \frac{(z_\mu^*)^{-i} z_\lambda^j}{N_{A^*}'((z_\mu^*)^{-1}) N_A'(z_\lambda)} A_i^* B_w V B_w^T A_j$$

Представление разложений через собственные вектора

Рассмотрим уравнение Сильвестра с диагоналируемыми матрицами

$$AX + XB = C, \quad AV = V\Lambda, \quad W^*B = MW^*, \\ \Lambda = \text{diag}(\lambda_i), \quad M = \text{diag}(\mu_j), \quad \lambda_i + \mu_j \neq 0, \forall i, j,$$

где $V = [v_1, \dots, v_n]$ и $W = [w_1, \dots, w_k]$ – матрицы левых и правых собственных векторов соответственно для матриц A и B .

В [Antoulas, 2005] получены спектральные разложения для X в виде:

$$X = - \sum_{i=1}^n v_i v_i^* C (\lambda_i I_k + B)^{-1} = - \sum_{j=1}^k (\mu_j I_n + A)^{-1} C w_j w_j^*$$

В докладе [Vassilyev et al., WC IFAC 20, 2017] получены аналогичные спектральные разложения для решения уравнения Ляпунова (в котором $B = A^*$, $M = \text{diag}(\lambda_j^*)$), а также его разложение по парным комбинациям собственных векторов:

$$X = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j^* \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j^*} v_j^* v_i$$

Обобщение на матричные уравнения Крейна

Ядыкин И.Б., Исакаев А.Б., ДАН, 472(4), 388-392 (2017)

Рассмотрим матричное уравнение Крейна (Далецкий, Крейн 1970):

$$\sum_{j,k=0}^N a_{jk} A^j X B^k = Q$$

Введём обозначения: $R_i^A \equiv \text{Res}((\lambda I - A)^{-1}, \lambda_i)$ и $R_j^B \equiv \text{Res}((\mu I - B)^{-1}, \mu_j)$

– вычеты резольвент матриц A и B взятые в их собственных числах

$\lambda_i \in \sigma(A)$ и $\mu_j \in \sigma(B)$ соответственно; $P(Y, Z) \equiv \sum_{j,k=0}^N a_{jk} Y^j Z^k$ –

скалярный или матричный полином в уравнении Крейна;

Теорема. Пусть A и B имеют простые спектры $\sigma(A)$ и $\sigma(B)$ такие что $P(\lambda_i, \mu_j) \neq 0$ для всех $\lambda_i \in \sigma(A)$ и $\mu_j \in \sigma(B)$. Решение уравнения Крейна X представляется в виде:

$$X = \sum_i R_i^A \cdot Q \cdot [P(\lambda_i I, B)]^{-1} = \sum_j [P(A, \mu_j I)]^{-1} \cdot Q \cdot R_j^B = \sum_{i,j} \frac{R_i^A \cdot Q \cdot R_j^B}{P(\lambda_i, \mu_j)}$$

Области возможных применений спектральных методов

- Проектирование технических систем по критериям энергоэффективности и надежности
- Управление активами энергетических и машиностроительных компаний в реальном времени (техническая диагностика)
- Обнаружение и предупреждение техногенных аварий
- Отказоустойчивое управление
- Противоаварийное управление
- Новые стандарты и нормативные документы
- Высшее образование: новые учебные курсы (магистры и аспиранты), дистанционное обучение

Методы спектрального оценивания (Лаборатория 38)

В качестве критериев используются амплитуда, энергия, число осцилляций и многие другие параметры зарегистрированного сигнала. Использование подобных критериев неэффективно, когда наряду с сигналами от источника акустического сигнала регистрируются мощные акустические помехи. Одним из способов решения данной проблемы является использование **спектральных характеристик**, более адекватно отражающих физическую природу импульсов.

Классические методы:

периодограммные (основаны на прямом преобразовании Фурье и последующем усреднении) и **кореллограммные** (основаны на оценке корреляционной функции).

- метод периодограмм Шустера;
- метод модифицированных периодограмм;
- метод Бартлетта;
- метод Уэлча;
- метод Блекмана-Тьюки.

Параметрические методы: подразумевают наличие мат. модели анализируемого случайного процесса, и сводятся к поиску оптимальных параметров модели.

Различают следующие типы моделей: **АР-модель** ("авторегрессия"), **СС-модель** ("скользящее среднее"), **АРСС-модель**.

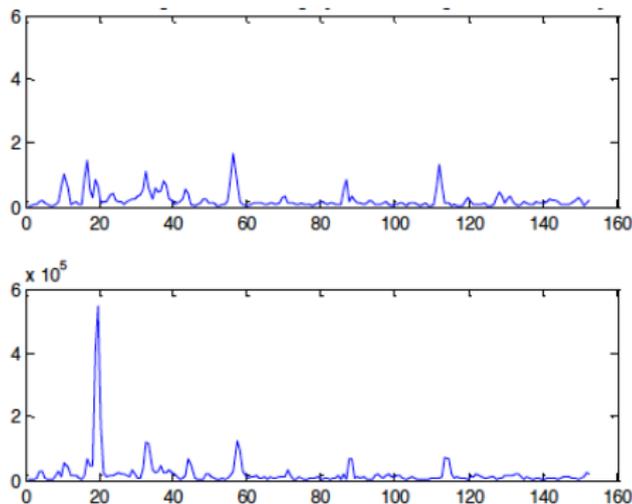
Методы оценки АР-параметров:

- метод Юла-Уокера;
- ковариационный метод;
- модифицированный ковариационный метод;
- метод Берга.

Задача диагностики редуктора

Имеется редуктор, состоящий из двух шестерен с числами зубьев Z_1 и Z_2 , установленными на валах, вращающихся в подшипниках. Валы редуктора вращаются с частотами $f_1 = \omega_1/(2\pi)$ и $f_2 = \omega_2/(2\pi)$, где ω_1 и ω_2 – угловые частоты валов. В этом случае $f_2/f_1 = Z_2/Z_1$. Вибрации в таком редукторе без учета подшипников в первом приближении описываются полигармоническим процессом. Составляющими этого процесса являются гармоники частот валов kf_1 и kf_2 , где $k = 1, 2, \dots$, а также гармоники зубцовых частот шестерен $kf_1 Z_1$ и $kf_2 Z_2$. Требуется на основе оценок амплитуд частотных составляющих вибрационного процесса принять решение о состоянии редуктора. Решение поставленной задачи для конического редуктора при $Z_1 = 19$, $Z_2 = 44$ и $f_2 \approx 19$ демонстрируют спектры вибраций исправного (сверху) и неисправного (внизу) с дефектом шестерни с $Z_2 = 44$

Задача диагностики редуктора



Дефект редуктора проявляется в значительном увеличении амплитуды частотной составляющей на частоте 2.

Однако следует заметить, что рассмотренный подход к диагностике редуктора не учитывает наличия модуляционной и шумовой вибрационных составляющих. Их учет позволит расширить возможности диагностики за счет использования большего числа информативных признаков.

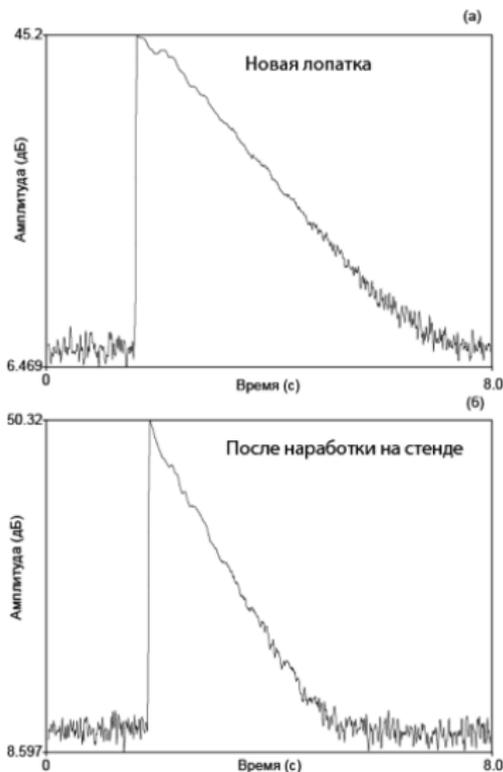
Задача диагностики состояния материала детали

Имеется деталь, необходимо определить состояние ее материала и ее остаточный ресурс с помощью анализа колебаний в детали, вызванных ударным возбуждением.

Для решения этой задачи лабораторией 38 ИПУ РАН совместно с АО НПЦ газотурбостроения "Салют" была разработана методика диагностики, основанная на предположении, что по мере наработки детали в структуре ее материала растет число микродефектов, на которых происходит поглощение энергии запасенной при ударе. Последнее с необходимостью должно проявляться в более быстром затухании колебаний, возбужденных в детали.

Справедливость предложенной методики диагностики была подтверждена экспериментально на примере лопаток компрессора турбореактивного

Задача диагностики состояния материала детали

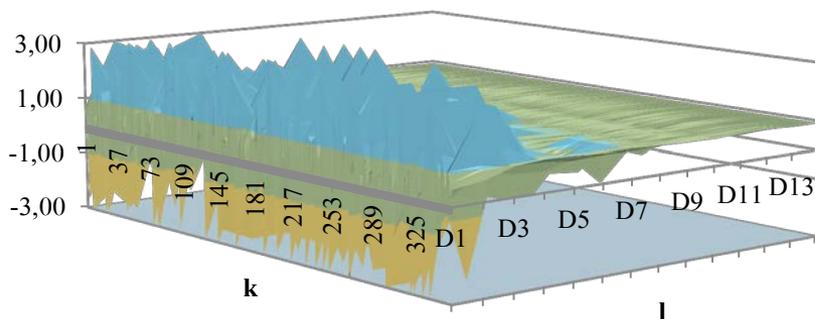
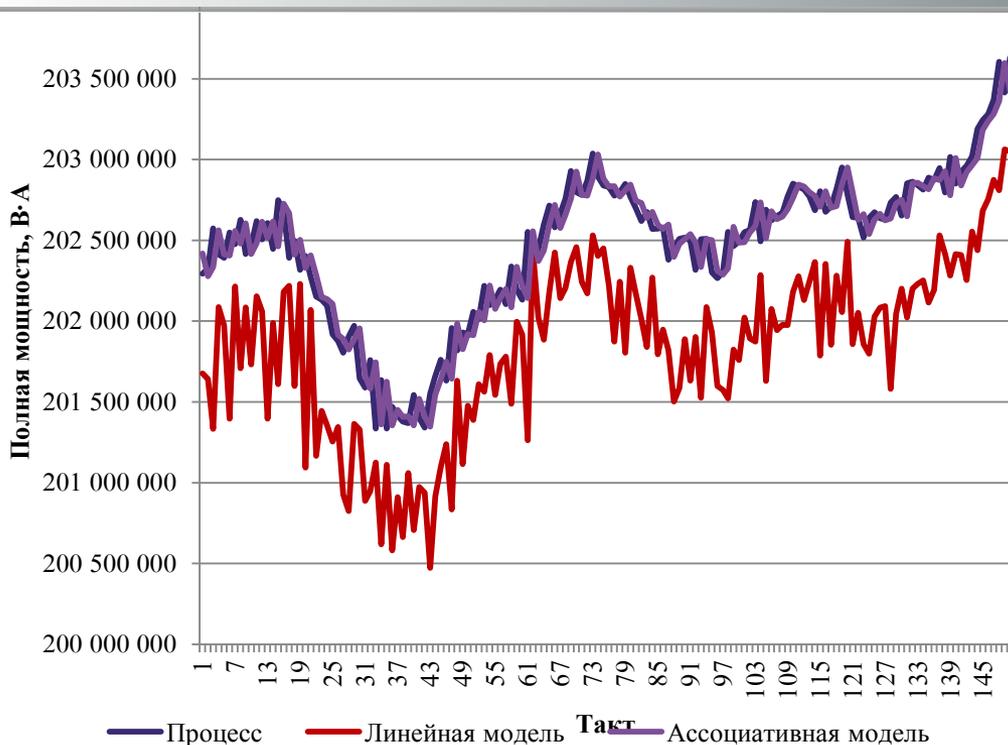


После наработки лопатки на стенде скорость затухания первой моды значительно увеличивается. Это означает, что скорость затухания возбужденной моды может быть использована в качестве информативного признака состояния материала детали.

Проводя ресурсные испытания изделия до разрушения, можно построить зависимость скорости затухания моды от времени наработки и тем самым получить возможность предсказания остаточного ресурса детали при ее диагностике.

Если в детали при ударе возбуждается несколько мод, то при ее диагностике целесообразно использовать информацию о затухании нескольких возбуждаемых мод.

Методы динамического прогнозирования состояния нестационарных объектов на основе вейвлет-анализа



Разработаны:

1. Интеллектуальные методы прогнозирования - на основе вейвлет-анализа и ассоциативного поиска
2. Методы прогнозирования приближения системы к неустойчивому состоянию, – на основе анализа кратномасштабного вейвлет-разложения
3. Методы прогнозирования перехода к хаотической динамике - необходимые и достаточные условия

Исследование устойчивости на основе вейвлет-анализа



Прогнозирующая ассоциативная модель нелинейного нестационарного объекта

$$y_N = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i y_{N-i} + \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^S b_{j,s} x_{N-j,s} \quad (1)$$

$$x(t) = \sum_{k=1}^L c_{L,k}^x(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^L d_{j,k}^x(t) \psi_{j,k}(t), 2^L \leq N < 2^{L_{max}+1},$$

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\lfloor N/2^L \rfloor + 1} c_{L,k}^y(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{\lfloor N/2^j \rfloor + 1} d_{j,k}^y(t) \psi_{j,k}(t), 2^L \leq N < 2^{L_{max}+1},$$

где: L – глубина кратно-масштабного разложения ($1 \leq L < L_{max}$, где $L_{max} = \lfloor \log_2 N \rfloor$); $\varphi_{L,k}(t)$ – масштабирующие функции («скейлинг-функции»); $\psi_{j,k}(t)$ – вейвлет-функции, которые получаются из материнских вейвлетов путем растяжения/сжатия и сдвига

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi_{\text{материнский}}(2^j t - k)$$

(в качестве материнских вейвлетов в данной работе мы рассматриваем вейвлеты Хаара); j – уровень детализации анализа; $c_{L,k}$ – масштабирующие коэффициенты, $d_{j,k}$ – детализирующие коэффициенты. Коэффициенты вычисляются посредством алгоритма Малла [18].



Необходимые и достаточные условия устойчивости

$$\left| \frac{\mu_1}{2\mu_0} \right| < 1; \left| -\frac{\mu_2}{\mu_1} \right| < 1; \dots; \left| -\frac{2\mu_r}{\mu_{r-1}} \right| < 1, \quad (13)$$

$$\mu_0 = d_{j,k}^y(t) \neq 0;$$

$$\mu_1 = a_1 \cdot d_{j,k}^y(t-1) + \sum_{s=1}^S b_{1,s} d_{j,k}^{x_s}(t-1); \dots$$

$$\mu_m = a_m d_{j,k}^y(t-m) + \sum_{s=1}^S b_{m,s} d_{j,k}^{x_s}(t-m);$$

$$\mu_{m+1} = \sum_{s=1}^S b_{m+1,s} d_{j,k}^{x_s}(t-m-1); \dots$$

$$\mu_r = \sum_{s=1}^S b_{r,s} d_{j,k}^{x_s}(t-r).$$

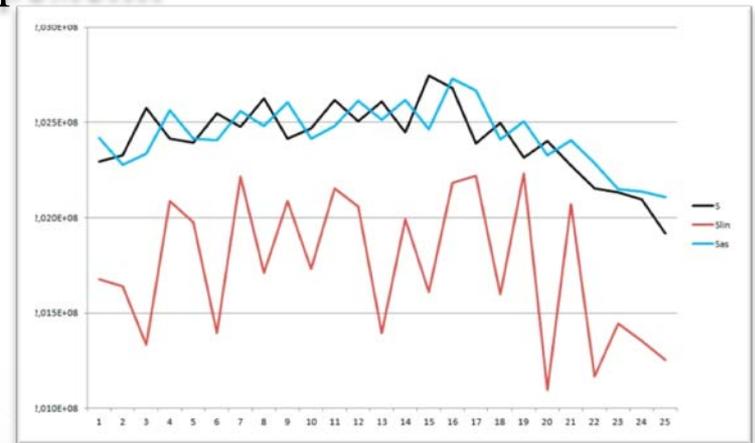


Разработка принципов и методов управления режимами систем электроснабжения в общей системе иерархического координированного адаптивного управления режимами ЕЭС

Осуществлена разработка методов построения динамических моделей энергосистемы **на основе интеллектуального анализа технологических данных**, настраиваемых в режиме реального времени

Основой для построения интеллектуальных моделей являются данные мониторинга (в частности, на основе ОИК) переходных режимов.

Разработаны идентификационные динамические модели по частоте и активной мощности.





РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ И МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ОБЩЕЙ СИСТЕМЕ ИЕРАРХИЧЕСКОГО КООРДИНИРОВАННОГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЕЭС

- На основе системы мониторинга переходных режимов (СМПР) и методов идентификации разработаны **методы динамической оценки состояния агрегатов** в процессе их эксплуатации
- Технология **оценки динамики участия генерирующих объектов** глобальной энергосистемы **в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ)** в случае нештатных ситуаций
- **Методология автоматической дистанционной диагностики** генерирующих мощностей в ходе реальной эксплуатации
- Подход к созданию систем управления электроснабжением на основе **мультиагентных технологий**.
- Методология разработки интеллектуальных **агентов**, формирующих свои стратегии на основе **прогнозирующих идентификационных моделей**



Новизна методов

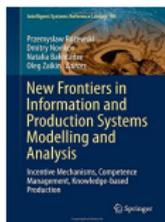
- **Энергетический подход** к оценке состояния и управлению техническими системами
- Обобщение спектральных разложений для грамианов на более общий класс решений **произвольных матричных уравнений Крейна**
- Отображение **баланса энергии на узлы и ветви графа** динамической системы, узлы которого соответствуют конкретным техническим устройствам
- В задаче оценки устойчивости – упрощение анализа путем выделения доминантных мод и соответствующих им составляющих квадрата H_2 нормы – выявление и оценка **"узкого горлышка" перетока энергии на графе** модели
- В задаче оценки технического состояния выявление **критических узлов** с аномальным изменением нормы энергетического функционала
- **Методы ассоциативного поиска и крупномасштабные вейвлет разложения** использованы для разработки системы мониторинга и управления режимами систем электроснабжения

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Sylvester J. (1884) Sur l'équation en matrices $pX=qX$.
- Ляпунов А.М. (1893) Общая задача об устойчивости движения.
- Bartels R.H., Stewart G.W. Solution of the matrix equation $AX+XB=C$. Commun. ACM., 15, 820-826 (1972)
- Golub G.H., Nash S, Van Loan C. Hassenberg-Schur method for problem $AX+XB=C$. IEEE Trans. Autom. Contr., 24(6), 909-913 (1979)
- Годунов С.К. Лекции по современным аспектам линейной алгебры. Новосибирск: Научная книга. 2002.
- Поляк Б.Т., Щербаков П.С.. Робастная устойчивость и управления. М: Наука. 2002.
- Демиденко Г.В. Матричные уравнения. Уч. пособие. Новосибирск: Изд. НГУ, 2009.
- Икрамов Х.Д. Численное решение матричных уравнений М: Наука. 1984.
- Далецкий Ю.Л., Крейн М.Г. Устойчивость решений дифференциальных уравнений в банаховом пространстве. М.: Наука. 1970.
- Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами М: Наука. 1976
- Benner P., Damm T. Lyapunov equations, Energy Functionals and Model Order Reduction of Bilinear and Stochastic Systems. SIAM J. Control Optim. 49(2), 686-711 (2011)
- Bunse-Gerstner A. et al., h2-norm optimal model reduction for large scale discrete dynamical MIMO systems. J. Comput. Appl. Math., 233(5), 1202-1216 (2010)
- Simonchini V., Computational methods for Linear Matrix Equations. SIAM Review, 58(3), 377-441 (2014)
- Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Земляков С.Д., Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами. М: Наука.1980

Основные публикации и проекты

Главы в монографиях в 2015 и 2016 гг.



> 20 Публикаций SCOPUS за 3 года



Control Engineering Practice



Проекты в 2016 году:



Основные публикации

- Yadykin I.B. et al., Characterization of power systems near their stability boundary using the sub-Gramian method // *Control Eng. Practice* 53, 173-183 (2016)
- Ядыкин И.Б., Исакаев А.Б. Энергетический подход к анализу устойчивости линейных стационарных динамических систем // *Автоматика и телемеханика* №11, 37-58 (2016)
- Yadykin I.B. et al., Stability analysis of large-scale dynamical systems by sub-gratian approach // *Int. J. Robust Nonlin. Control* 24 (8-9), 1361-1379 (2014)
- Yadykin I.B. et al., Characterization of power systems near their stability boundary by Lyapunov direct method // *IFAC Proceedings Volumes*, 19th World Congress, 47 (3), 9087-9092 (2014)
- Ядыкин И.Б., Галяев А.А. О методах вычисления грамианов и их использовании в анализе линейных динамических систем // *Автоматика и телемеханика*, №2, 53-74 (2013).
- Ядыкин И.Б., Галяев А.А. О методах вычисления грамианов непрерывных динамических систем // *ДАН*, 450(4), 397-400 (2013)
- Yadykin I. et al., Stability in Small Signals Investigation of Nonlinear Dynamic Power Systems // *IFAC Proceedings Volumes*, 19th World Congress, 47 (3), 9069-9074 (2014)
- Ядыкин И.Б., О спектральных разложениях решений дискретных уравнений Ляпунова // *ДАН*, 468(3) 264-267 (2016)
- Катаев Д.Е., Ядыкин И.Б. О решении матричных дифференциальных уравнений Ляпунова частотным методом // *Известия РАН. Теория и Системы Управления*, №6, 3-15 (2016)
- Yadykin, I.B., Maximov, E.M. "Knowledge-based Models for Smart Grids." P. Rózewski et al. (eds.) *New Frontiers in Information and Production Systems Modelling and Analysis, Intelligent Systems Reference Library 98, Springer*, 2016. Pp. 189-210.
- Bakhtadze N. et al., Associative Search and Wavelet Analysis Techniques in System Identification // *IFAC Proceedings Volumes*, 45(16), 1227-1232 (2012)
- Bakhtadze N.N., Sakrutina E.A. Information Identification Models in Variable Structure Control Systems // *Int. J. of Control Systems and Robotics*, 2016, V.1, 37-43
- Bakhtadze N., Lototsky V. "Knowledge-Based Models of Nonlinear Systems Based on Inductive Learning" P. Rzewski et al. (eds.) *New Frontiers in Information and Production Systems Modelling and Analysis, Intelligent Systems Reference Library 98, Springer*, 2016. Pp. 85-104

Разрабатываемые технологии

- Технология мониторинга оценки устойчивости электроэнергетических систем. Уровень готовности: 4.
- Технология оценки и прогноза технического состояния воздушного судна. Уровень готовности: 2.
- Технология оценки технического состояния подвески колес автомобиля. Уровень готовности: 1.

Конкурентные преимущества: междисциплинарный и инновационный характер, цифровые и интеллектуальные производственные технологии, интеллектуальный транспорт, "зеленый" город, электрический автомобиль и электрический самолет, противодействие техногенным угрозам, международные проекты (доступ к новым компетенциям).

Потенциальные заказчики: ОАО РЖД, ОАО "Россети", ПАО "ИнтерРАО", Роскосмос, Сколтех, РНФ, НТЦ Электроэнергетики, ГосНИИАС, ЦАГИ, МАИ, МЭИ, МВТУ, Университет Ковентри.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !