

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ УПРАВЛЕНИЯ

КОНДРАШИН А.В., канд. техн. наук

Предложен подход к анализу процессов управления объектами, отличающимися пространственной распределенностью (по длине). Акцент анализа сделан на характеристики процессов, влияющие на надежность и долговечность теплоэнергетического оборудования.

Ключевые слова: термонапряженные поверхности нагрева, распределенность по длине объекта, автоматическое регулирование.

PROCESS QUALITATIVE ANALYSIS IN RATIONING HEAT POWER CONTROL OBJECTS

A.V. KONDRASHIN, Candidate of Engineering

The author considers the approach to process analysis of objects management which have differences of spare state of distribution (in length). The analysis accent is made on process characteristics influencing on the heat power equipment reliability and operating life.

Key words: thermostressed heat surfaces, state of distribution in object length, automated regulation.

В сложившейся практике проектирования и наладки систем управления теплоэнергетическим оборудованием электростанций доминирует критериальный анализ качества только управляемых (выходных) координат объекта $y(t)$ (рис. 1):

$$Q = f[y(t)]. \quad (1)$$

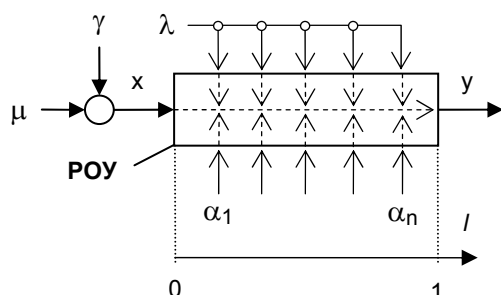


Рис. 1. Схема модели распределенного по длине объекта управления

В редких случаях прибегают к учету особенностей поведения управляющего процесса $\mu(t)$, требуя от него ограниченного числа перемен знака при отработке характерных детерминированных возмущений. Следовательно, критериальную особенность такой постановки задачи можно модифицировать, представляя ее в виде

$$Q = f[y(t), \mu(t)]. \quad (2)$$

Модель (2) можно считать частным случаем известного в теории и практике оптимального управления обобщенного интегрального показателя качества

$$Q = \int_0^{\infty} \{f_1[y(t)] + f_2[\mu(t)]\} dt. \quad (3)$$

Однако внутренние процессы в объекте не учитываются и, следовательно, не влияют на принимаемые решения.

Такой подход вполне уместен для так называемых «сосредоточенных» объектов, но он может привести к неоптимальным или даже ошибочным решениям, существенно снижающим технологические возможности оборудования. Некоторые аспекты такого

анализа рассматривались в [1, 2]. Продолжим его далее, изучая принципиально важные для практики качественные явления, влияющие на надежность и долговечность работы термонапряженных поверхностей нагрева паровых котлов. Примем во внимание найденную в [1] закономерность, согласно которой на среднюю интенсивность потока отказов $\lambda(t)$ в каждом сечении тракта l влияют три режимные особенности процесса:

- $T_{cp}(l)$ – среднее значение температуры теплоносителя;
- $\sigma_T^2(l)$ – дисперсия отклонения температуры от своего среднего значения T_{cp} ;
- $\omega_T(l)$ – средняя частота колебаний процесса.

Установлено, что в характере влияния этих факторов на проявление скрытых дефектов оборудования и на усталостные явления есть отличия, позволяющие использовать следующую аддитивную модель для их оценки:

$$\lambda(t, L) = \lambda_{def}(t, \sigma_T^2, T_{cp}, L) + \lambda_{уст}(t, \sigma_T^2, \omega_T, T_{cp}, L). \quad (4)$$

Свойства внутреннего процесса в сечении l будем представлять корреляционной функцией

$$R_T(\tau, l) = \sigma_T^2 \rho_T(\tau, l) \quad (5)$$

и математическим ожиданием температуры

$$T_{cp}(l) = M\{T(t, l)\}. \quad (6)$$

Дисперсию и среднюю частоту колебаний процесса можно связать с частотными особенностями случайного процесса, используя для этого формулы нулевого и первого моментов функции спектральной плотности:

$$\sigma_T^2(l) = \int_0^{\infty} S_T(\omega, l) d\omega; \quad (7)$$

$$\omega_T(l) = \int_0^{\infty} \omega S_T(\omega, l) d\omega, \quad (8)$$

где

$$S_T(\omega, l) = \int_{-\infty}^{\infty} R_T(\tau, l) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (9)$$

В целях обобщения суждений ниже вместо упоминавшейся выше температуры потока T будем использовать переменную y . В соответствии с рис. 1, состояние процесса в некотором сечении $y(t, l)$ можно связывать с эффектами влияния входных процессов x , λ и α .

Будем при этом исходить из некоррелированности внешних возмущений $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$. Следовательно,

$$\rho_{\alpha_i, \alpha_j} = 0. \quad (10)$$

Для внешнего возмущения λ принципиально важной является распределенность по длине объекта. Формально это можно выразить коэффициентом корреляции

$$\rho_{\lambda_i, \lambda_j} = 1. \quad (11)$$

Характеризуя процесс $x(t)$, следует исходить из его коррелированности с внешними возмущениями λ и α . Это объясняется тем, что он формируется не показанным на схеме регулятором, получающим на вход информацию о процессе y на выходе объекта. Таким образом, будем для описания свойств процесса в некоторой точке исходить из аддитивной модели:

$$y(t, l) = y_x(t, l) + y_{\lambda_l}(t, l) + y_{\alpha_l}(t, l). \quad (12)$$

Влияние некоррелированных факторов α традиционно и не представляет интереса, так как сводится к механическому суммированию результатов фильтрации их соответствующими участками объекта. Поэтому дальнейшее исследование, нацеленное на оценку влияния распределенности объекта и внешнего возмущения, ограничим двумя первыми составляющими модели (12). Для упрощения записи опустим аргумент длины l .

С учетом коррелированности процессов y_x и y_λ дисперсия в некотором сечении объекта может быть записана в виде

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y_x}^2 + 2\rho_{y_x, y_\lambda} \sigma_{y_x} \sigma_{y_\lambda} + \sigma_{y_\lambda}^2, \quad (13)$$

учитывающем коррелированность составляющих с помощью коэффициента корреляции ρ . Можно принять во внимание и особенность этого коэффициента, обусловленную тем, что y_x используется для ослабления влияния y_λ . В таком случае

$$-1 \leq \rho_{y_x, y_\lambda} \leq 0. \quad (14)$$

Наиболее эффективному управлению будет соответствовать условие

$$\sigma_{y_x}^2(l) = \sigma_{y_\lambda}^2(l) \text{ при } \rho_{y_x, y_\lambda} = -1, \quad (15)$$

так как при этом общая дисперсия в точке l , в соответствии с (13), будет равна нулю.

В качестве иллюстрации подхода рассмотрим два характерных примера [3]. В первом будем считать отсутствующим регулятор. Это дает основания считать процессы y_x и y_λ некоррелированными ($\rho = 0$). Модель такого варианта задачи представлена на рис. 2.

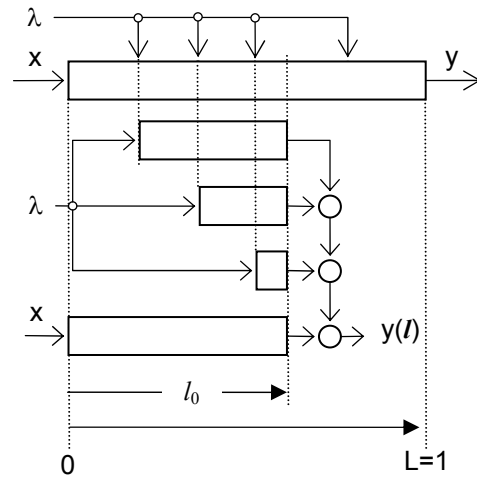


Рис. 2. Расчетная схема модели распределенного по длине объекта управления

Считая аккумулирующую способность канала пропорциональной длине, воспользуемся простейшей моделью канала

$$W_o(p, l) = [Tlp + 1]^{-1}. \quad (16)$$

Свойства процессов x и λ опишем моделями марковского процесса первого порядка:

$$R_x(\tau) = \sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|}; \quad (17)$$

$$R_\lambda(\tau, l) = \bar{\sigma}_\lambda^2(l) e^{-\beta(l)|\tau|}. \quad (18)$$

В формулах (17) и (18) подчеркнута параметрическое различие моделей, обусловленное сосредоточенностью входного воздействия x и распределенностью внешнего возмущения λ . Функция $\beta(l)$ учитывает различие частотных свойств возмущения в разных сечениях канала, а $\sigma^2(l)$ – распределение общей мощности возмущения по длине объекта. Так что

$$\sigma_\lambda^2 = \int_0^1 \bar{\sigma}_\lambda^2(l) dl. \quad (19)$$

В примере будем исходить из частного случая, соответствующего равномерности такого распределения. Следовательно, при относительности длины канала

$$\bar{\sigma}_\lambda^2 = \frac{\sigma_\lambda^2}{L} = \sigma_\lambda^2. \quad (20)$$

Спектральная плотность процесса y_x находится по тривиальному соотношению:

$$S_{y_x}(\omega, l_0) = |W_o(j\omega, l_0)|^2 S_x(\omega).$$

Результатом подстановок будет выражение

$$S_{y_x}(\omega, l_0) = \frac{2\alpha \sigma_x^2}{(\omega^2 + \alpha^2) [(Tl_0\omega)^2 + 1]}. \quad (21)$$

При определении спектра процесса y_λ необходимо принимать во внимание накопительный характер этой функции, отображенный на рис. 2 суммирующими элементами. В алгоритмической записи для этого используем интеграл:

$$S_{y_\lambda}(\omega, l_0) = \int_0^{l_0} \frac{2\beta \cdot \bar{\sigma}_\lambda^2}{(\omega^2 + \beta^2) \{ [T(l_0 - l)\omega]^2 + 1 \}} l dl. \quad (22)$$

Из-за громоздкости выражения результат интегрирования здесь приводить не будем, тем более что главная сущность подхода уже представлена. Используя модели (21) и (22), можно найти общую спектральную плотность процесса

$$S_y(\omega, l_0) = S_{y_x}(\omega, l_0) + S_{y_\lambda}(\omega, l_0). \quad (23)$$

Подставляя ее в (7) и (8), получим искомые характеристики процесса, влияющие на технологические показатели объекта, – надежность и долговечность. Напомним, что излагаемый выше пример связан с анализом поведения объекта в условиях отсутствия регулятора. На рис. 3 показаны дисперсии, а на рис. 4 – средние частоты колебаний процессов y_x и y_λ для всех промежуточных сечений канала. Расчеты выполнены для случая $T=1, \sigma_x^2 = 1, \sigma_\lambda^2 = 1$

при варьируемых значениях параметров α и β , имеющим отношение к процессам $x(t)$ и $\lambda(t)$ соответственно. То обстоятельство, что $T = 1$, позволяет считать частоту относительной и распространять результаты на все реальные значения этой постоянной времени.

Теоретический анализ функций (7) и (8), а также результаты примера расчета позволяют считать их выпуклыми. Следовательно, на интервале относительной длины объекта следует ожидать возможности существования минимума каждого из показателей.

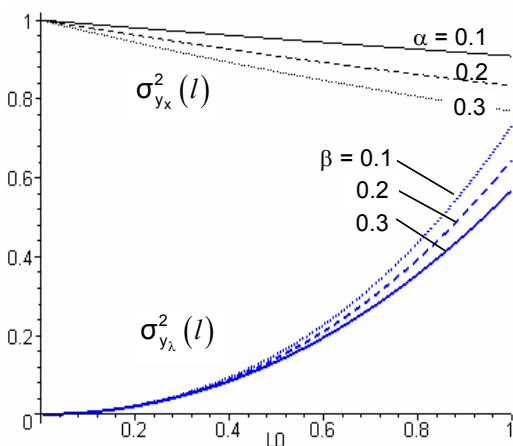


Рис. 3. Характер изменения составляющих общей дисперсии процесса в различных сечениях канала

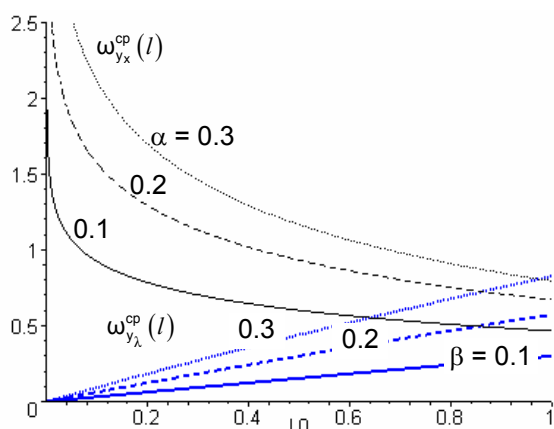


Рис. 4. Характер изменения средней частоты колебаний процесса в различных сечениях канала

Этот вывод усиливается в связи с тем, что характер функций имеет «конфликтный» характер, когда при уменьшении одной составляющей общего эффе-

кта вторая увеличивается. На рис. 5 и 6 показаны примеры композиции процессов y_x и y_λ , отличающиеся совпадением свойств входных процессов, когда $\alpha = \beta$.

Анализ суммарной дисперсии процесса (рис. 5) показывает, что в объекте можно найти сечение с наименьшим уровнем дисперсии колебаний. Его положение зависит от частотных особенностей процессов на входе. Экстремум сдвигается вправо при увеличении параметров α и β , т.е. при повышении частоты входных воздействий. Приблизительно среднюю частоту марковского процесса 1-го порядка можно связать с параметром α (или β) соотношением

$$\omega^{cp} \approx 35 \alpha. \quad (24)$$

Анализ средней частоты процесса (рис. 6) показывает, что все процессы в нашем примере идут с понижением частоты. В реальных условиях это может не соблюдаться. Вполне реальна ситуация, при которой при низкочастотных свойствах $x(t)$ и высокочастотных особенностях распределенного по длине тракта внешнего возмущения $\lambda(t)$ средняя частота процесса будет увеличиваться по длине тракта.

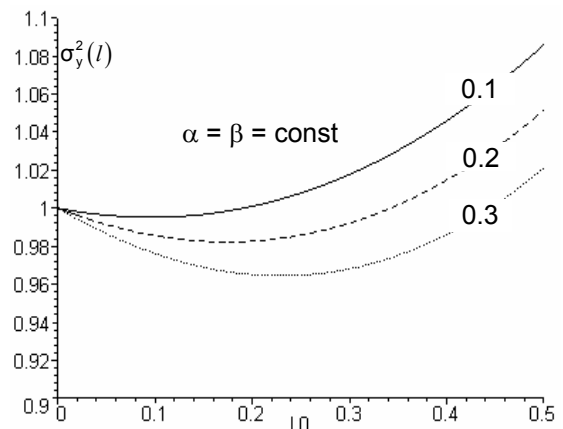


Рис. 5. Суммарная дисперсия процесса в различных сечениях канала

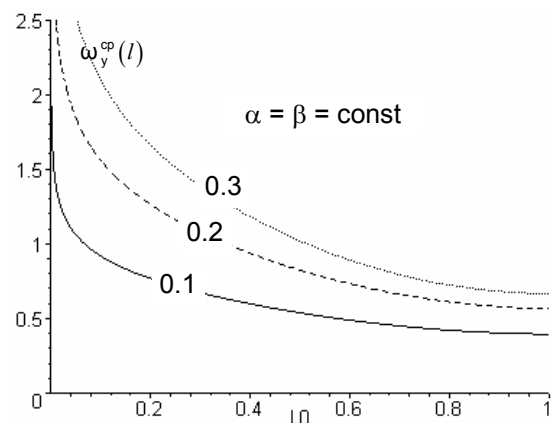


Рис. 6. Средняя частота процесса в различных сечениях канала

Теперь рассмотрим задачу с автоматической системой регулирования (АСР), образованной распределенным объектом и ПИ-регулятором. В качестве модели объекта возьмем вариант, свойства которого отвечают важной характеристике реального объекта – дифференцируемости переходной функции при $t = 0$:

$$W_o(p, l) = [(0,5 T l p + 1)(T l p + 1)]^{-1}. \quad (25)$$

Регулятор настраивается на степень затухания переходных процессов $\psi = 0,75$. Рабочая частота выбирается из условия максимума быстродействия регулятора (в точке максимума отношения k_p/T_n). Оптимизация не включена в условия задачи, главная цель которой состоит в иллюстрации характерных свойств процессов внутри распределенного объекта в условиях автоматического регулирования. При $T = 1$ расчеты приобретают относительный характер.

На рис. 7 представлена расчетная схема АСР, предусматривающая контроль процесса в любом сечении канала. Для выделенных (затененных) элементов характерна накопительность эффекта влияния внешнего возмущения, выраженная интегралом (22). Свойства внешнего (распределенного) возмущения отвечают модели (18).

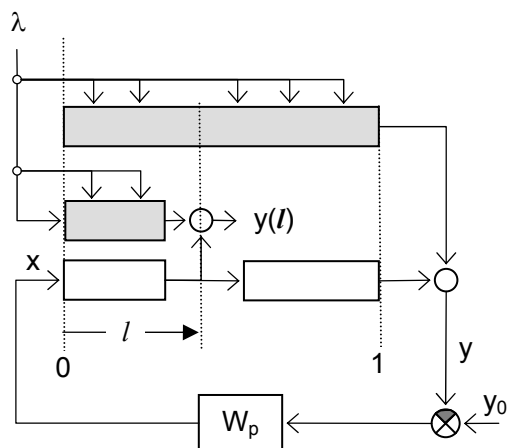


Рис. 7. Расчетная схема модели АСР с распределенным объектом

Результаты расчетов представлены на рис. 8 и 9. Из них ясно следует значительная распределенность дисперсии и среднего значения частоты процесса по длине канала. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что дисперсия процесса на входе многократно превосходит аналогичный показатель на выходе. Причем это различие существенно зависит от частотных свойств возмущений в объекте.

На реальный вид функции распределения может существенно повлиять технологическая специфика объекта. В частности, для пароперегревателей характерна не только естественная неравномерность мощности теплового потока, но и перераспределение типов этих потоков (радиационный, конвективный, смешанный). Причем это различие может оказаться характерным даже для одной ступени пароперегревателя. Поэтому в практическом анализе особенностей управления очень востребованной является технологическая информация о режимах оборудования.

Заслуживающей внимания особенностью характера распределения средней частоты по длине канала является наличие входной области, для которой среднее значение частоты существенно превышает значение резонансной (рабочей) частоты АСР. Наряду со

Кондрашин Анатолий Васильевич,
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
 кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов,
 tvd@atp.ispu.ru

спецификой распределения дисперсии, это очень существенно для оценки эксплуатационной надежности и долговечности входных участков пароперегревателей.

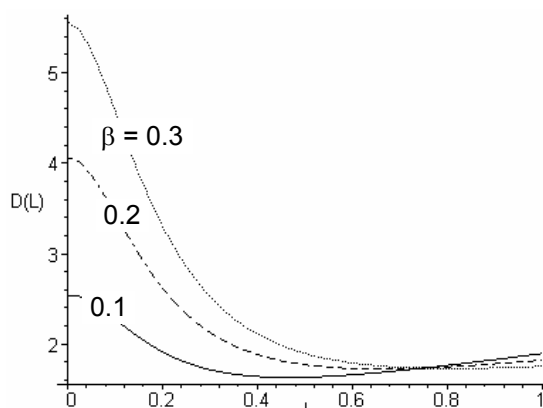


Рис. 8. Характер изменения дисперсии процесса по длине канала в условиях функционирования АСР

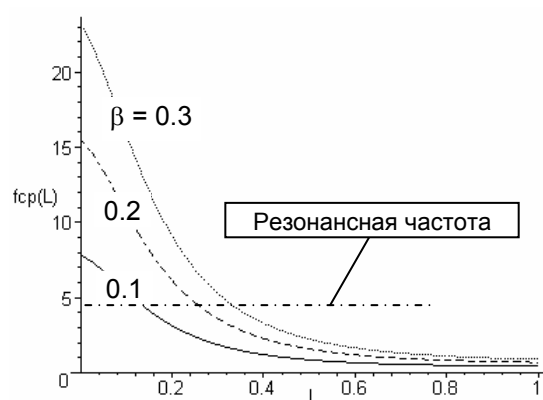


Рис. 9. Характер изменения средней частоты процесса по длине канала в условиях функционирования АСР

Завершая анализ особенностей процесса, отметим актуальность применения предложенного подхода к оценке надежности и долговечности теплоэнергетического оборудования. Комплексное понимание процессов открывает возможность более оправданного подхода к структурной и параметрической оптимизации АСР.

Список литературы

1. Кондрашин А.В. Влияние качества управления на долговечность металла паровых котлов: Мат-лы конф. «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования». – Иваново, 2002. – С. 254–258.
2. Кондрашин А.В. Принципы проектирования автоматических систем регулирования для теплоэнергетических объектов: Учеб. пособие. – Иваново: ИЭИ, 1975.
3. Кондрашин А.В. Технологические основы управления теплоэнергетическими процессами. – М.: ИСПО–Сервис, 2004.