

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И НАСТРОЙКИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

КОНДРАШИН А.В., канд. техн. наук, ШАФЕРМАН М.В., инж.

Приводятся обоснование и пример применения системного подхода к моделированию объекта управления, ориентированному на задачи синтеза систем регулирования, работающих в широком диапазоне нагрузок.

Ключевые слова: система регулирования, ошибки управления, паровой тракт, газовый тракт, нагрузка турбины.

PRINCIPLES OF NONSTATIONARY MODEL DEVELOPMENT FOR CONTROL SYSTEM RESEARCH AND ADJUSTMENT

A.V. KONDRASHIN, Ph.D., M.V. SHAFERMAN, engineer

This paper is devoted to the basis and the sample of using system approach for simulation of control object, oriented on synthesis objectives of control systems, which work in a wide range of loadings

Key words: control system, control faults, steam path, gas path, turbine loading.

Создание новых и модернизация действующих систем управления в теплоэнергетике должны основываться на реальной возможности расширения области эффективной работы автоматических регуляторов за счет применения микропроцессорных средств автоматики, свободно реализующих самые совершенные алгоритмы управления. Для отработки таких систем необходимы математические модели объектов, позволяющие исследовать процессы управления в широком интервале режимов работы оборудования. Традиционные подходы, ориентированные на так называемые квазистационарные режимы, становятся малоэффективными.

Модель объекта (рис. 1), в которой традиционное выделение основного (регулирующего) канала $x \rightarrow y$ и канала внешнего возмущения $\lambda \rightarrow y$ дополнено параметрическими (пунктирными) связями, оказывающими в переходных режимах существенное влияние на динамические характеристики каналов, была предложена в [1]. Ниже приведем сведения, полезные для понимания сущности и последующего ее применения.

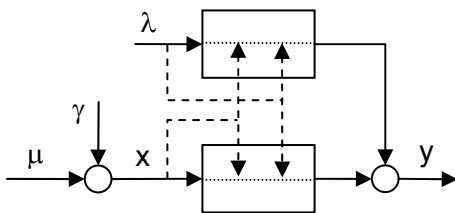


Рис. 1. Схема связанности каналов объекта управления

Для краткости изложения ограничимся объяснением влияния внешнего воздействия λ на природу ошибок управления, свойственных системе регулирования. Удобнее всего это показать, используя частотные свойства объекта и процессов (рис. 2).

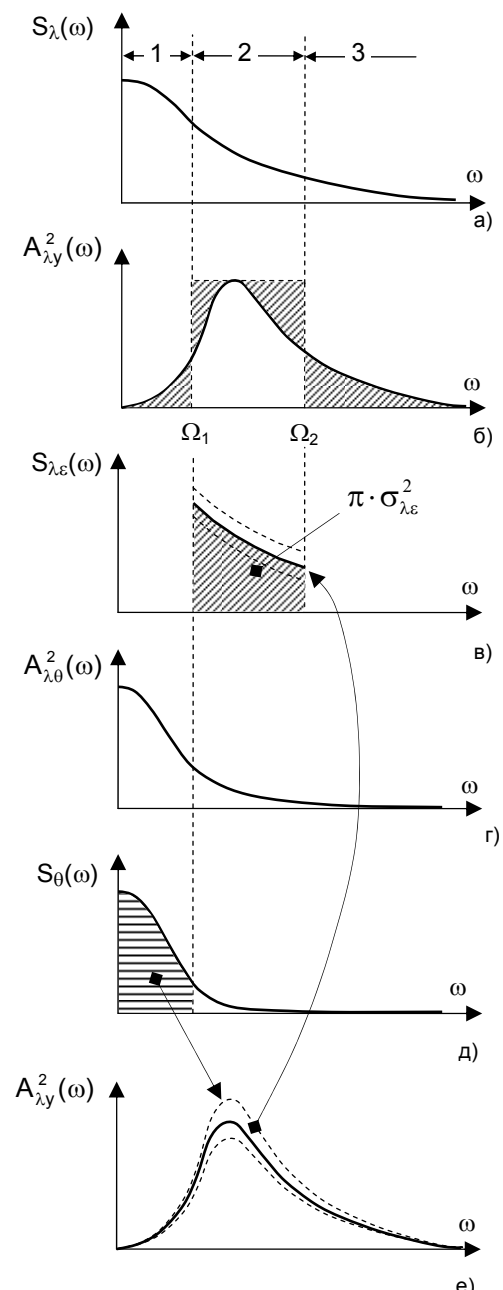


Рис. 2. Частотный анализ управляемого объекта процессов

Спектральная плотность воздействия $S_\lambda(\omega)$ определена на интервале частот, существенных для замкнутой системы. Ее свойства выражены квадратом модуля АЧХ системы $A_{\lambda y}^2(\omega)$. Идеализируя их, найдем интервал частот $\Omega_1 \div \Omega_2$, существенных для формирования ошибки управления. Дисперсия ошибки $\sigma_{\lambda \varepsilon}^2$ пропорциональна площади, выделенной на третьем графике, так как

$$\sigma_{\lambda \varepsilon}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} A_{\lambda y}^2(\omega) S_\lambda(\omega) d\omega. \quad (1)$$

Параметрическое влияние λ на параметры θ основного канала объекта в общем случае также носит динамический характер и может быть представлено частотной характеристикой (рис. 2, г). Эффект этого влияния имеет явно выраженный низкочастотный характер, наследующий свойства произведения двух монотонно убывающих функций:

$$S_\theta(\omega) = A_{\lambda \theta}^2(\omega) S_\lambda(\omega). \quad (2)$$

Поэтому основная мощность параметрического влияния сконцентрирована в низкочастотной области $\omega \in [0 \div \Omega_1]$. Это отражается на свойствах основного канала объекта $W_{xy}(j\omega, \theta)$ и в конечном счете сказывается на изменении запаса устойчивости, выраженном вариациями АЧХ в области резонансной частоты. А это, в свою очередь, приводит к изменению спектральной плотности ошибки управления $S_{\lambda \varepsilon}(\omega)$ в области частот $\Omega_1 \div \Omega_2$. В результате дисперсию ошибки управления можно выразить суммой

$$\sigma_{\lambda \varepsilon}^2 = \sigma_{\lambda \varepsilon, 0}^2 \pm \Delta \sigma_{\lambda \varepsilon}^2, \quad (3)$$

первое слагаемое в которой характеризует качество стабилизации регулируемой переменной в квазистационарном режиме, а второе – эффект параметрического влияния.

При кажущейся «безобидности» такой модели ошибки, наивно оцениваемой по равновероятным вариациям дисперсии (знак « \pm »), на самом деле все сложнее. Этому есть несколько объяснений.

Во-первых, при наладке систем обычно добиваются наилучшего качества управления, т.е. минимальной дисперсии, достигаемой за счет согласованности свойств регулятора и объекта. И если в процессе эксплуатации происходит изменение свойств объекта, не учитываемое в свойствах настроенного регулятора, то качество управления только ухудшается.

Во-вторых, примем во внимание, что равнозначные вариации самого максимума АЧХ приведут к преобладающему влиянию положительного приращения квадрата, так как

$$1 - (1 - \Delta)^2 < (1 + \Delta)^2 - 1.$$

И это может сказаться не только на уменьшении запаса устойчивости, но и на существенном ухудшении качества управления, для оценки которого в условиях переменных режимов предложено несколько показателей [1]. Выделим два из них, наиболее полезных для нормальных (штатных) режимов работы оборудования, а именно:

- условный риск R_1 , оценивающий потери от ошибок управления ε в режиме λ ;
- безусловный риск R_2 , определяемый на всем множестве характерных режимов работы оборудова-

ния, приведенных к определенному периоду (например, к году или к сезону – лето, зима и т.п.).

Эти два показателя связаны между собой отношением, характерным для условных вероятностей:

$$R_2 = M \{R_1 | \lambda\} = \int_{\lambda \in D_\lambda} R_1(\varepsilon | \lambda) p(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где $p(\lambda)$ – плотность распределения вероятности режимного фактора.

В задачах синтеза систем эта функция приобретает смысл прогноза, от точности которого во многом будет зависеть качество проектного решения. Доказано [1], что абсолютный минимум R_2 будет достигнут только при наивысшей точности управления на каждом из режимов, т.е. при минимуме условного риска R_1 . Это полностью согласуется с принципами оптимального управления, реализуемыми на основе теории и методов динамического программирования.

Приведенные сведения должны подтвердить исключительную актуальность разработки моделей, адекватно отражающих свойства объектов в прогнозируемой области вариации значений режимных факторов.

Примером постановки и решения такой задачи является нестационарная модель котла, ориентированная на задачи синтеза систем регулирования мощности и температуры перегрева.

Концептуально динамическая модель учитывает зависимость параметров каналов объекта от факторов Z , которыми являются взаимосвязанные качественные Y и количественные G характеристики потоков. К качественным характеристикам относятся давления (P) и температуры (T), а к количественным – расходы теплоносителя. Таким образом, модель, обладая свойствами нестационарности, становится нелинейной.

Физическая сущность параметрического воздействия режимных факторов на динамику объекта связана с понятиями аккумулирующей способности, проявляющейся в явлениях аккумуляции массы и теплоты. Первое явление – аккумуляция массы – основано на зависимости плотности теплоносителя ρ от основных качественных параметров своего термодинамического состояния (P , T). Второе явление – аккумуляция теплоты – главным образом определяется условиями теплообмена между взаимодействующими компонентами теплообменника. Количественно это характеризуется коэффициентом теплоотдачи α , связанным сложной критериальной зависимостью с термодинамическими свойствами потока, с конструктивными и теплофизическими характеристиками оболочки и, наконец, со скоростью потока. При прочих, относительно мало изменяющихся параметрах, именно скорость, определяемая через расход теплоносителя, играет решающую роль при переменных режимах:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \left(\frac{G}{G_0} \right)^n. \quad (5)$$

Отметим, что в представленной схеме (рис. 3) реализована встречная ориентация связей, характерная для парового тракта теплоэнергетической установки (ступеней пароперегревателей, паропроводов, паровой магистрали). Для газового тракта (топка, зоны ступеней перегрева пара, экономайзера и воздухоподогревателя) используется согласованная ориентация.

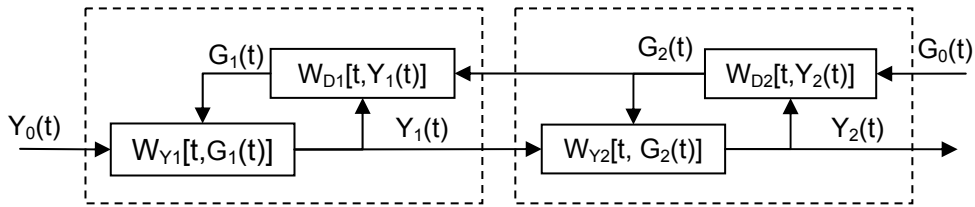


Рис. 3. Концептуальная схема связанности каналов в нестационарной модели парового тракта

Первым подходом к разработке модели является аналитическое описание процессов, учитывающее их теплофизику и конструктивные параметры моделируемого оборудования. С учетом сложности реального процесса и в целях исключения решения нелинейной системы уравнений на каждом такте имитационных расчетов моделируемый технологический участок представляется необходимой совокупностью эквивалентных передаточных функций, определенных на отношениях «вход – выход»:

$$W(p, Z) = k(Z) \frac{1 + \sum_{i=1}^m b_i(Z) p^i}{1 + \sum_{i=1}^n a_i(Z) p^i} e^{-\tau(Z)p}. \quad (6)$$

Эффект нестационарности в такой модели канала выражен зависимостью параметров «а» и «b», а также статического коэффициента усиления «k» от режимного фактора Z.

Подобный подход обладает еще одним функциональным достоинством – возможностью использования моделей, полученных в ходе испытаний оборудования. Вполне естественно, что получить исчерпывающее описание многорежимного объекта в ходе таких испытаний крайне затруднительно. Поэтому мы исходим из достаточности получения адекватной модели хотя бы в одном из характерных режимов работы оборудования. Подобная модель является квазистационарной «по определению»:

$$W_0(p) = k \frac{1 + \sum_{i=1}^m b_{i,0} p^i}{1 + \sum_{i=1}^n a_{i,0} p^i} e^{-\tau_0 p}. \quad (7)$$

Для придания ей нестационарных свойств предложено использовать известные физические зависимости параметров, выражающих упомянутые выше накапливающие и статические свойства канала, от режимных факторов – нагрузки (расхода теплоносителя) и термодинамических характеристик потока.

При всей абстрактности моделей (6) и (7) следует иметь в виду, что они описывают динамику так называемых распределенных объектов посредством формального (порой неосознанного) деления их на последовательно или параллельно соединенные компоненты. Поясним это утверждение известной в ТАУ возможностью любую систему, описываемую обыкновенным дифференциальным уравнением n-го порядка, представленным в операторной форме

$$W(p) = k \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + 1}{a^n p^n + \dots + a_1 p + 1},$$

разложить либо в виде суммы

$$W(p) = k \left[c_0 + \sum_{i=1}^n k_i \frac{T_i p}{T_i p + 1} \right],$$

либо в виде произведения

$$W(p) = k \prod_{i=1}^n \frac{\alpha_i T_i p + 1}{T_i p + 1}.$$

Параметр «Т_i» и является характеристикой аккумулирующей способности соответствующей i-й части теплообменника. В переменных режимах значения k и T_i под влиянием режимных факторов изменяются. Удобно представить эти изменения с помощью масштабных коэффициентов:

$$m_k = f_k(Z); \quad m_T = f_T(Z). \quad (8)$$

Не нарушая общности рассуждений и не заменяя аргумента Z, введем масштабный коэффициент и для запаздывания τ:

$$m_\tau = f_\tau(Z), \quad (9)$$

понимая его приоритетную зависимость, прежде всего, от скорости потока, т.е. от расхода G.

Подставляя (8) и (9) в модель (7), переводим ее в категорию нестационарной, согласующейся с (6):

$$W_0(p) = k m_k(Z) \frac{1 + \sum_{i=1}^m b_{i,0} m_T^i(Z) p^i}{1 + \sum_{i=1}^n a_{i,0} m_T^i(Z) p^i} e^{-\tau_0 m_\tau(Z) p}. \quad (10)$$

Изложенный выше подход был использован для создания нестационарной модели котла ТП-87. За основу модели пароперегревателя были взяты результаты факторного эксперимента [3]. Они представили динамику пароперегревателя только в части, оценивающей аккумуляцию теплоты и затрагивающей проблему регулирования температуры перегретого пара (пример влияния нагрузки на динамику одного из каналов приведен на рис. 4).

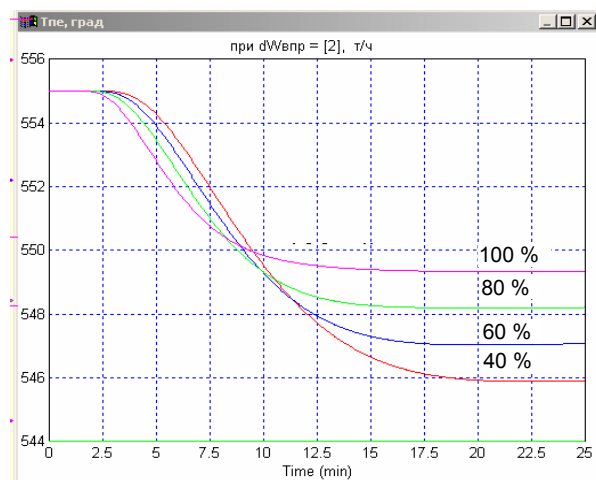


Рис. 4. Кривые разгона выходной ступени пароперегревателя при возмущении расходом воды на впрыск

Для полномасштабного моделирования переменных режимов (нагрузок) потребовалось создать модель аккумуляции массы в потоке пара, определившую динамику расхода пара в разных участках парового тракта. Относительная сложность задачи заключалась в потребности обеспечить моделирование не только собственно динамики давлений и расходов пара, но и краевых условий (со стороны топки и со стороны турбины) (рис. 5).

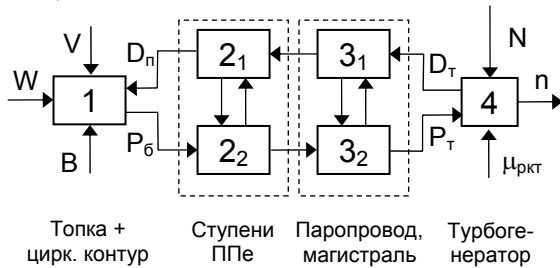


Рис. 5. Укрупненная схема модели, учитывающая краевые условия

В связи с отсутствием экспериментальных материалов решение этой задачи базировалось на аналитических расчетах. Использовались алгоритмы, приведенные в [2]. В качестве исходной информации использовались конструктивные характеристики котла и его тепловой расчет. Кроме того, при моделировании турбогенератора было учтено наличие регулятора скорости турбины (PCT), позволяющего участвовать ей в первичном регулировании частоты и активной мощности энергосистемы. Была задана и степень неравномерности PCT, равная 4 %.

Непосредственным итогом аналитического описания явились системы нелинейных дифференциальных уравнений, прямое использование которых в режиме имитационного моделирования крайне затруднительно. Поэтому с помощью вариантных расчетов, отличающихся относительной производительностью котла (45, 60, 75, 90 и 100 %), удалось получить эквивалентные характеристики всех интересующих нас ступеней пароперегревателя, а также каналов замыкающих моделей (краевых условий).

Результатом обработки таких расчетов стали нелинейные функции

$$a_i = a_i(G), \quad b_i = b_i(G), \quad (11)$$

определяющие коэффициенты модели (6). Следует заметить, что в соответствии с упомянутым в начале статьи делением факторов на качественные и количественные следовало бы наряду с моделями (11) иметь и модели вида

$$a_i = a_i(Y), \quad b_i = b_i(Y). \quad (12)$$

Однако нами были учтены выявленные в результате расчетов статические нелинейные функции

$$Y_i = f_i(G), \quad (13)$$

позволившие внести дополнительные упрощения в созданную модель. Если по объективным предпосылкам параметрические модели (11)–(13) не могут быть отнесены к типу статических, то принятый способ упрощения недопустим.

Кривые разгона по температуре перегрева, полученные при возмущении изменением расхода пара,

обусловленным 5 %-м снижением нагрузки турбины (рис. 6), иллюстрируют эффект системного подхода к моделированию.

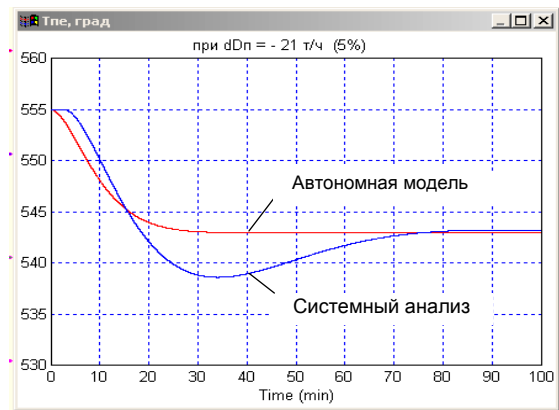


Рис. 6. Динамика выходной ступени пароперегревателя при снижении нагрузки турбины на 5 %

Различия в реакции котла объясняются, прежде всего, специфическим поведением расхода пара, а также фактом параметрической связанности каналов по расходу пара и по температуре перегрева. Характер изменения расхода пара (рис. 7) учитывает реальную скорость сброса нагрузки, формируемую PCT.

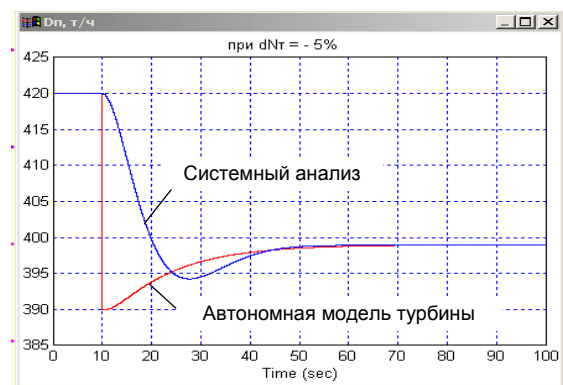


Рис. 7. Динамика поведения расхода пара на турбину при снижении ее нагрузки на 5 %

Обоснованность концептуальных положений, затрагивающих функциональные возможности моделей теплоэнергетического объекта управления, была подтверждена в процессе разработки нелинейной нестационарной модели котла, пригодной для имитационного моделирования при проектировании и наладке систем регулирования.

Список литературы

1. Кондрашин А.В. Принципы организации и проектирования подсистем оперативного управления АСУ ТП: Учеб. пособие. – Иваново, 1980..
2. Кондрашин А.В. Технологические основы управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Полиграфическая фирма «Испо-Сервис», 2004.
3. Кондрашин А.В., Лебедев А.Т., Гушло В.Н., Светлов В.Д. Идентификация промышленных объектов с учетом изменения условий работы оборудования // Теплоэнергетика. – 1974. – №12.

Кондрашин Анатолий Васильевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов,
телефон (4932) 26-99-09,
e-mail: tvd@atp.ispu.ru

Шаферман Михаил Владимирович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры автоматизации технологических процессов,
телефон (4932) 26-99-09,
e-mail: tvd@atp.ispu.ru