

К вопросу определения настроечных параметров функционального регулятора

В. Л. Лазарев
Университет ИТМО
holod25@yandex.ru

М. С. Степанова
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

УДК 681.5

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы, связанные с определением настроечных параметров регуляторов в случайных динамических режимах. Излагаемый подход основан на оценке качества процесса регулирования на базе показателей состояния неопределенности регулируемого параметра относительно заданного уставного значения. В качестве таких показателей предложено использовать понятия величин энтропийных потенциалов, введенных в рамках соответствующей теории. Такой подход не противоречит существующим методам, но дополняет и «расширяет» их возможности. Внедрение предлагаемых решений будет способствовать повышению адаптивности системы регулирования к изменяющимся условиям работы и характеру действующих возмущений.

Ключевые слова: регулятор; законы регулирования; теория энтропийных потенциалов; адаптивное регулирование

I. ВВЕДЕНИЕ

Функциональные законы регулирования, наряду с позиционными законами (в основном двух и трех позиционными) получили широкое распространение в различных отраслях промышленности, экономики и др. Использование функциональных законов позволяет получать более высокое качество процесса регулирования, изменять его вид и характер протекания. «Обратной стороной» этого преимущества является то, что зачастую возникают проблемы с определением значений настроечных параметров в конкретных ситуациях. Задача определения настроечных параметров регулятора является частным вариантом задачи синтеза систем автоматического регулирования (САР). Специфические ситуации, возникающие при решении подобных задач, обусловлены наличием различных требований к качеству процесса регулирования, наличием априорной неопределенности относительно каналов поступления возмущающих воздействий, их вида, характера проявления и других факторов. Кроме того, исходные требования и специфика ситуаций могут изменяться в процессе регулирования, что, в свою очередь, порождает требования к созданию методик и алгоритмов адаптации настроек регулятора [1, 2].

«Классические» методы определения настроечных параметров ориентированы на конкретные «детерминистские» ситуации для сочетаний ограниченных требований к виду и качеству переходных процессов и

свойств и особенностей объекта. Они позволяют получать приближенные результаты [1–3].

Одним из распространенных является метод, основанный на использовании приближенных формул для статических и астатических типов объектов и для трех вариантов переходных процессов. Таковыми являются: апериодический процесс, процесс с 20% перерегулированием и процесс с минимальным значением величины среднеквадратичной ошибки регулирования.

Другая приближенная методика выбора закона регулирования и определения значений настроечных параметров, для типовых законов, основана на использовании специальных номограмм. Для обращения к ней, в качестве исходных аргументов, необходимо определить значения вспомогательных коэффициентов на основе отдельных характеристик объекта и возможных возмущений.

Также, в инженерной практике, используются метод синтеза САР на основе частотных характеристик, позволяющий получать приближенное решение стоящей задачи. Причем процесс нахождения решения зачастую может состоять из ряда итеративных процедур, направленных на уточнение предыдущих результатов. Существуют различные модификации метода.

Более адаптивными, по своим возможностям, являются т.н. экспериментальные методы настройки. Суть их состоит в том, что в процессе работы САР на вход регулятора подается какой-либо испытательный сигнал, например, синусоидальный. Мощность сигнала относительно невелика, что практически не сказывается на работе системы. На основании результатов анализа откликов системы, в виде соответствующих частотных характеристик, уточняются настроечные параметры. Возможны и другие варианты испытательных сигналов. Достоинством этих методов является то, что они позволяют проводить оперативную настройку регуляторов в условиях отсутствия полной информации о моделях элементов системы и, в частности, объекта, непосредственно в производственных условиях. Это обстоятельство является важным, т.к. в реальных производственных условиях свойства объекта, параметры его математической модели могут изменяться, например, в силу изнашивания оборудования, изменения его загрузки, условий эксплуатации и др.

Повышение эффективности методов настройки САР возможно на путях внедрения новых подходов и методов

оценки качества процесса регулирования. Для этого необходимо использовать критерии, позволяющие осуществить комплексный учет «вариативных» свойств регулируемого параметра. Одним из перспективных для этих целей является подход, основанный на использовании методов теории энтропийных потенциалов (ТЭП).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Идея излагаемого подхода состоит в следующем. Вариации параметра в процессе регулирования можно рассматривать, как его состояние неопределенности относительно заданного наперед значения или т.н. уставки регулятора. В идеальном случае, значение регулируемого параметра должно быть равно величине уставки. Однако в реальности, в силу различных причин (специфика проявлений возмущений, несовершенство структуры и настроек САР и др.), будут иметь место случайные отклонения регулируемого параметра относительно уставки, что и порождает возникновение указанного состояния неопределенности. Минимизация этого состояния будет способствовать повышению качества регулирования. Реализация такого замысла обуславливает необходимость выбора эффективного критерия для описания состояния неопределенности параметра при синтезе или настройке САР.

Простейшими характеристиками состояния неопределенности параметра являются взаимосвязанные величины, характеризующие его разброс или рассеяние: дисперсия – σ^2 и среднеквадратическое отклонение (СКО) – σ . Они используются для описания этих состояний в различных задачах. Для повышения качества исследований и решения задач синтеза систем, в различных вариантах, необходимо использовать более совершенные критерии, учитывающие в комплексе и другие свойства состояний неопределенности [2, 4]. Таковыми должны являться величины базового значения параметра, на «фоне» которого рассматривается это состояние – X_n и какая-либо характеристика вариативных свойств закона распределения параметра. Также желательно, чтобы величины используемых критериев выражались вещественными числами, что будет способствовать удобству их применения. Обзор существующих и перспективных вариантов решений по описанию состояний неопределенности приведен в работах [4–6]. В значительной мере предъявляемым требованиям отвечает комплекс понятий энтропийных потенциалов, взаимосвязанных между собой на основе «агрегации». Для решения обозначенной проблемы предлагается использовать величины энтропийного потенциала (ЭП) – Δ_e и комплексного энтропийного потенциала (КЭП) – L_Δ , которые определяются из выражения

$$L_\Delta = \frac{\Delta_e}{|X_n|} = \frac{K_e \sigma}{|X_n|}. \quad (1)$$

В выражении (1), наряду с вышеупомянутыми обозначениями, использована величина энтропийного коэффициента закона распределения отклонений параметра от уставного значения в процессе регулирования – K_e . Значения этой величины «описывают» вариативные свойства закона распределения отклонений

параметра, степень предсказуемости появления тех или иных значений. Методы определения значений величин энтропийного коэффициента на основе результатов наблюдений в различных ситуациях, а также аналитическими путями, проработаны и приведены в специальной литературе [4, 6, 7]. Величина K_e характеризует размах значений параметра: чем больше ее значение, тем больше размах и, наоборот [8]. Величина ЭП является унифицированной характеристикой состояния неопределенности, которая, в отличие от «классической» величины СКО, учитывает также и вариативные свойства закона распределения в виде сомножителя K_e . Унификация состояний неопределенности параметров с различными законами распределения осуществляется на базе «размаха» для закона равномерной плотности, из условия эквивалентности энтропий. Поэтому размерность величины ЭП совпадает с размерностью анализируемого параметра. Несмотря на очевидные достоинства величины ЭП для описания состояний неопределенности различных параметров, использование ее в задачах синтеза САР может иметь ограничения. Так, например, как оценить качество настройки САР температуры в объекте, если состояние неопределенности температуры относительно уставки регулирования характеризуется значением ЭП $\Delta_e = 10^0 \text{C}$? Для ответа на такой вопрос необходимо знать значение базовой величины (в данном случае уставки) – X_n , на фоне которой анализируется температурный режим. В случае, например, когда объектом регулирования является камера или печь для обжига керамических изделий, кирпичей и пр., где значения температурного режима достигают порядка 1000^0C , то такое качество регулирования является вполне приемлемым. Если объектом регулирования является, например, камера для холодильного хранения пищевых продуктов, где требуется поддерживать температурный режим на уровне -5^0C , то такое качество регулирования будет являться неприемлемым и может привести к порче продукции. Поэтому более объективной оценкой состояния неопределенности регулируемого параметра будет являться величина КЭП, определяемая из выражения (1). Согласно определению она является безразмерной, что позволяет использовать КЭП в качестве критерия для описания и сравнения состояний неопределенности различных параметров на основе энтропийного подхода. Причем, чем меньше значение величины L_Δ , тем «выше» качество регулирования и, наоборот. Теперь задача синтеза САР, в свете изложенного подхода к обеспечению качества регулирования, будет основываться на условии

$$L_\Delta(A_i) \rightarrow \min; (i \in I), \quad (2)$$

где $A_i, (i \in I)$ – множество варьируемых и (или) настроечных параметров. В ряде случаев, в качестве альтернативного варианта, возможно использование требования по ограничению величины L_Δ , например, в виде условия $L_\Delta(A_i) \leq L_\Delta(\max); (i \in I)$, где $L_\Delta(\max)$ – предельно допустимое значение величины КЭП.

Использование условия (2) при синтезе САР расширяет возможности существующих подходов, способствует их совершенствованию. Если в процессе регулирования величина базового значения и вид закона распределения

отклонений параметра от уставного значения не изменяются, то величина L_Δ вырождается в масштабное изображение величины σ . Эта ситуация описывается условиями: $X_n = const$ и $K_e = const$. В результате задача синтеза САР, основанная на использовании условия (2), сведется к классическому варианту, основанному на минимизации величины дисперсии или СКО. В обратной ситуации, когда $X_n - var$ и $K_e - var$, использование (2) позволяет осуществить адаптацию САР к изменению свойств объекта управления, уставных значений регулятора и характера возмущений.

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЭП

Так как задача определения настроечных параметров на основе методов ТЭП является одной из частных задач синтеза САР, то ее решение будет основано на общей методологии решения подобных задач на базе энтропийного подхода, изложенной, например, в работах [5, 6, 9]. При этом необходимо учитывать сопутствующую специфику.

Закон регулирования F – зависимость, по которой определяется величина регулирующего воздействия $h(t)$, подаваемого на объект управления, от величины рассогласования $e(t)$ между регулируемым параметром $x(t)$ и величиной уставки $X_n(t)$. То есть

$$h(t) = F(e(t); A_i) = F((x(t) - X_n); A_i); (i \in I), \quad (3)$$

где t – текущее время; $A_i, (i \in I)$ – множество настроечных параметров закона регулирования.

Зависимость F может иметь значительное множество различных форм и видов и иметь различные множества настроечных параметров $A_i, (i \in I)$. При этом возникают проблемы при выборе, аппаратной реализации, эксплуатации и настройке соответствующих регуляторов на практике. Для упрощения таких проблем, обычно используют ограниченный ряд т.н. типовых законов, синтезированных на основе унифицированных моделей, которые по своим возможностям позволяют в значительной мере удовлетворить реальным требованиям к качеству процессов регулирования и характеристикам САР. Наиболее «совершенным» по своим возможностям является пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон регулирования, для которого зависимость (3) имеет вид

$$h(t) = k \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (4)$$

В ПИД законе имеются три настроечных параметра: k – коэффициент передачи, T_i – постоянная интегрирования и T_d – время предвращения. Другие типовые законы, в основном, получаются в результате «упрощения» ПИД закона, путем исключения каких-либо слагаемых в квадратных скобках выражения (4). Так, например, если исключить два последних слагаемых, то получим т.н. пропорциональный (П) закон с одним настроечным параметром k . Исключив последнее слагаемое, получим

пропорционально-интегральный (ПИ) закон с двумя настроечными параметрами k и T_i . Аналогично получают другие законы регулирования.

Для организации поиска настроечных параметров, в соответствии с условием (2) или его вариантами, необходимо определить область устойчивости САР \mathbf{A} . Эта область определяется множеством значений настроечных параметров $A = \{A_i, i \in I = (1, 2...m)\}$,

характеризуется вектором настроечных параметров \vec{a} , при которых система является устойчивой. При этом полагается, что система является структурно устойчивой. В противном случае она является не работоспособной и нуждается в коррекции структуры. В общем случае, область устойчивости системы \mathbf{A} с m настроечными параметрами представляет собой гиперобъемную фигуру в m -мерном пространстве. Сказанное описывается условием

$$\vec{a} \in \mathbf{A}. \quad (5)$$

Построение областей устойчивости является инженерной задачей, для решения которой используются различные методы, основанные на использовании критериев устойчивости Рауса–Гурвица, Михайлова, Найквиста и др. [1–3]. Ужесточение требований к устойчивости системы в виде заданий запасов устойчивости по амплитуде ΔL и (или) по фазе $\Delta \varphi$, например, в виде условий

$$\begin{aligned} \Delta L &\geq \Delta L(\min); \\ \Delta \varphi &\geq \Delta \varphi(\min), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Delta L(\min)$ и $\Delta \varphi(\min)$ значения минимально допустимых запасов устойчивости, может привести к относительно «сжатию» исходной области \mathbf{A} .

Также возможно введение дополнительных требований к качеству переходного процесса, помимо условия (2) или его возможных вариантов, например, в виде соответствующих ограничений на длительность переходного процесса, величину перерегулирования и др. Хотя такие дополнения могут оказаться избыточными, т.к. величина L_Δ опосредствованно связана с упомянутыми частными показателями качества переходного процесса. Так, например, если настройки САР $A_i, i \in I$ являются «идеальными» т.е. выходной сигнал $x(t)$ без искажений повторяет изменение уставки $X_n(t)$, то время переходного процесса и величина перерегулирования будут равны нулю. С другой стороны это означает, что неопределенность значений регулируемого параметра относительно уставки отсутствует, что соответствует условию: $L_\Delta(A_i) = 0; i \in I$. Однако в общем плане этот вопрос до конца не исследован.

Исходя из изложенного подхода, задача определения настроечных параметров регулятора может быть сформулирована следующим образом.

Имеется структурно устойчивая САР с заданным априори законом регулирования (3). Требуется определить оптимальные значения настроечных параметров этого

закона $A_i(opt)$, $i \in I$ или оптимальный вектор настроечных параметров $\vec{a}(opt)$, из области (5), т.е. $\vec{a}(opt) \in \mathbf{A}$, на основе целевой функции или критерия оптимальности (2).

Применительно к вышерассмотренному примеру ПИД-регулятора (4), приведенная формулировка задачи будет означать следующее. Требуется произвести целенаправленное изменение настроечных параметров k , T_i и T_d для изменения значений комплекса величин K_e , σ и X_n , обеспечивающих минимально возможное значение показателя состояния неопределенности регулируемого параметра относительно уставки, в соответствии с (2). Суть состоит в том, что при изменении настроечных параметров регулятора изменяется передаточная функция САР, ее полоса пропускания следовательно, изменяются условия прохождения составляющих гармоник возмущений через систему. Следствием этого являются изменения закона распределения ошибок регулирования $e(t)$ и показателя разброса ошибок, которые характеризуются изменениями значений величин K_e и σ , соответственно.

Для практической реализации изложенного подхода разработаны методы нахождения базовых характеристик (K_e , σ и X_n) величин энтропийных потенциалов для различных ситуаций [4, 6, 7]. Таковыми, в частности, являются: метод определения энтропийных потенциалов на основе представительной выборки результатов наблюдений, метод определения в условиях априорной неопределенности или т.н. метод робастного оценивания, метод определения энтропийных потенциалов на основании характеристик входных воздействий и свойств объекта или метод косвенного оценивания и др.

Сформулированная выше задача определения настроечных параметров регулятора является частным вариантом задачи оптимального управления. Для ее решения в настоящее время разработаны различные подходы, методы, алгоритмы и программное обеспечение (ПО) [1, 2]. Результаты анализа существующих решений и опыт работы автора позволяют рекомендовать для решения таких задач метод статистического градиента (разновидность метода случайного поиска). Достоинствами метода являются:

- простота программирования, требует небольшого объема памяти, что позволяет осуществлять его реализацию на основе «малых» контроллеров;
- отсутствие эффекта «зацикливания» при попадании в точку локального экстремума;
- при повышении размерности задачи проявляется преимущество по быстройдействию по сравнению с другими методами;
- позволяет найти псевдооптимальное решение в любых ситуациях, причем точность нахождения решения возрастает с увеличением числа циклов поиска.

Реализация предлагаемого подхода позволит осуществить оперативную автоподстройку регулятора к изменяющимся условиям работы и характеру действующих возмущений. Для этого не требуется

внесения каких-либо изменений в его конструкцию на аппаратном уровне. Необходима доработка элементов ПО, связанная с вычислением величин K_e , σ и L_Δ .

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложен подход к определению настроечных параметров САР в случайных динамических режимах на основе методов ТЭП, который не противоречит существующим методам, а дополняет их возможности. Внедрение предложенных решений позволит повысить эффективность адаптации регулятора к изменяющимся условиям работы и характеру действующих возмущений. Рассмотрены возможности и перспективы практической реализации. Использование предложенных решений окажется продуктивным для решения задач исследования и управления различными объектами [10–12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.
- [2] Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник: В 5 т. / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
- [3] Ротач В.Я. Теория автоматического управления: Учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.
- [4] Мягкие измерения и вычисления. Монография в 5 томах. / Под ред. С.В. Прокопчиной. Том 1. Теоретические основы и методы. М.: ИД «Научная библиотека», 2017. 420с.
- [5] Lazarev V.L. Qualimetry of dynamic processes on the basis of entropy potentials concepts// Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017. Saint Petersburg, Russia. Publisher: IEEE. Pp. 87-89. DOI: 10.1109/CTSUS.2017.8109495.
- [6] Лазарев В.Л. Теория энтропийных потенциалов. С-Пб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. 127с.
- [7] А.М. Туричин, П.В. Новицкий, Е.С. Левшина и др. Электрические измерения неэлектрических величин. / Под ред. П.В. Новицкого. Л.: «Энергия», 1975. 576 с.
- [8] Лазарев В.Л. Исследование вариаций параметров на основе значений энтропийного коэффициента. //Сб. докладов XXI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2018. С-Пб., 23-25 мая 2018 г. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. Т.1, с.7-10.
- [9] Лазарев В.Л. Организация синтеза систем на основе оптимизации энтропийных потенциалов выходных параметров. // II Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (CTS'2017): Сб. докладов. С-Пб., 25-27 октября 2017 г. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. №1. С. 114-117.
- [10] Lazarev V.L. Epistemological foundations for generation of perspective competencies in the training of personnel for industrial and economic complex // 4th Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science, Education, Innovations). Saint Petersburg, Russia. November 11-13, 2015. Publisher: IEEE. Pp. 26–28. DOI: 10.1109/IV Forum.2015.7388242.
- [11] Dzino A.A., Malinina O.S., Noskov A.N. Power Generation Through Use of the Heat Emissions of Gas Compressor Units // Chemical and Petroleum Engineering – 2018, Vol. 54, No. 5-6, pp. 399-404.
- [12] Горохов В.Л., Холодняк Д.В. Сопоставление онтологических и когнитивных метафор сложных систем // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям «SCM-2018»: Сб. докладов 23-25 мая, 2018 г. С-Пб. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. С. 301-302.