

УДК 681.51.01

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЭС И АЭС

Г.Т. КУЛАКОВ

*Белорусский национальный технический университет
Независимости 65, Минск 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 29 января 2015*

Основной проблемой внедрения современных систем автоматического управления является обеспечение высокого качества их функционирования, включая оптимизацию по соответствующим критериям, относительно основных воздействий [1, 2].

Опираясь на многолетний опыт проведения экспериментально-наладочных работ по внедрению технических средств автоматизации на энергоблоках мощностью 150, 200 МВт и 300 МВт тепловых электрических станций, обоснована необходимость существенной модернизации промышленных регуляторов, применяемых для автоматизации теплоэнергетических процессов [3]. Кроме того, выявлен ряд принципиальных проблем, снижающих эффективность использования типовых промышленных регуляторов серийного производства: однотипность промышленных регуляторов, ограничивающая возможность выбора типа регулятора в зависимости от сложности регулирования объекта; «техническое противоречие», обусловленное использованием типовых регуляторов для автоматизации сложных многоемкостных объектов с запаздыванием, между быстродействием и устойчивостью систем; нестабильность динамических характеристик объектов, связанных с изменением режимов работы энергоблоков.

Широкое распространение в области автоматизации технологических процессов получили пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы, реализуемые на базе промышленных контроллеров. На базе ПИД-регуляторов можно получить как частный случай, любой типовой регулятор (П-пропорциональный, И-интегральный, ПИ-пропорционально-интегральный и ПД-пропорционально-дифференциальный). В большинстве ПИД-регуляторов используют методы настройки, основанные на аналитических формулах. Меньше применяют контроллеры на базе нейронных сетей и различных методов оптимизации. Однако доля патентов на контроллеры, использующие правила, в основном за счет регуляторов с нечеткой логикой, в последнее время значительно увеличилось. Возросла также доля патентов на регуляторы, использующие эволюционные алгоритмы и градиентные методы [4].

Алгоритмы функционирования ПИД-регуляторов были перенесены в промышленные контроллеры из аналоговых технологий, на базе которых можно реализовать простые алгоритмы регулирования, что ограничивает повышение качества регулирования и обуславливает ряд нерешенных проблем. Несмотря на сложность и разнообразие реальных объектов управления, в ПИД-регуляторах применяют, как правило, только две структуры математических моделей объектов регулирования: модель первого порядка с запаздыванием и модель второго порядка с запаздыванием. Это приводит к тому, что структура регуляторов в большинстве случаев не соответствует динамике объектов регулирования. Ограничение применения более точных, но сложных моделей обусловлено сложившимся «мифом» о невозможности аналитического решения систем уравнений, описывающей динамику регуляторов, структура которых соответствует динамике моделей объектов управления высокого порядка.

Кроме того, существуют нетиповые объекты, динамику которых описывают передаточными функциями колебательных звеньев; в числителе передаточных функций которых содержатся дифференциальные звенья, а также объекты, в которых входная величина в начальный момент времени после появления воздействия начинает падать, а затем – расти или наоборот. Такие процессы характерны для паровых котлов высокого давления (эффект «набухание» уровня воды в барабане) и др. Для указанных объектов нет простых методов аналитического расчета оптимальных параметров динамической настройки типовых регуляторов.

В настоящее время имеется около полусотни коммерческих продуктов [4] для динамической настройки ПИД-регуляторов. Среди них Foxboro EXACT™ (760/761), ПИД-регуляторы фирмы ABB и Emerson, Protuner фирмы Techmation Inc., LabVIEW PID Control Toolset фирмы National Instruments, Intelligent Tuner (Fisher-Rosemount), Profit PID (Honeywell), P.I.D. – expert («Техноконт») и др. При этом подавляющее большинство программ использует модели объектов первого порядка с запаздыванием для описания динамики объекта регулирования.

Развитие современных средств автоматизации технологических процессов идет в направлении расширения функциональных возможностей ПИД-регуляторов, применения методов искусственного интеллекта и методов диагностики, увеличения объема пользовательского интерфейса (анализ износа клапанов, оценка работоспособности, построение графиков спектральной плотности мощности и функций авто- и взаимной корреляции, оптимизация инверсий модели объекта управления и т.д.).

Точные аналитические решения задач оптимального управления традиционными методами удается получить лишь в редких случаях для простых объектов. Это привело к развитию вычислительных и приближенных методов построения систем оптимального управления.

Основой теоретических методов и алгоритмов расчета параметров динамической настройки в задачах синтеза типовых регуляторов является принцип динамической компенсации, который разделяет задачи синтеза регуляторов на два этапа: нахождение эталонной динамической характеристики (например, передаточной функции) замкнутой системы по задающему воздействию и последующий синтез регулятора, обеспечивающий равенство эталонной и реальной динамических характеристик системы, т.е. определение типа регулятора и параметров его динамической настройки.

При этом синтез оптимального регулятора в соответствии с рассматриваемым принципом динамической компенсации предполагает компенсацию динамики объекта. Так как в передаточную функцию оптимального регулятора входит обратная передаточная функция объекта, которую в большинстве случаев физически реализовать считается невозможным, то с учетом того, что структура типовых регуляторов не соответствует динамике сложных объектов, в инженерных расчетах стремятся приблизить, в известном смысле, равенство реального выходного сигнала эталонному процессу.

Для решения большинства современных проблем автоматизации технологических процессов разработаны основы теории структурно-параметрической оптимизации динамических систем, позволяющей существенно улучшить качество регулирования технологических процессов [4–8] и служащей основой внедрения базисных инноваций в области автоматизации теплоэнергетических процессов ТЭС и АЭС.

Предложено отказаться от структур классических типовых регуляторов, которые в частных случаях, для простых объектов регулирования получаются автоматическими. На первое место ставятся алгоритмы формирования оптимальной структуры регулирующего устройства и системы в целом, в зависимости от требований заказчика. При этом оптимальная структура регулирующего устройства зависит от трех основных факторов:

- математической модели участков объекта регулирования;
- вида возмущающего воздействия и места его приложения;
- заданного оптимального критерия качества, который входит в математическую модель регулятора.

Существенной особенностью первого фактора является то, что на структуру и порядок дифференциального уравнения, описывающего динамику объектов регулирования никаких ограничений не накладывается.

При синтезе оптимальной структуры регулирующего устройства определяющим фактором является отработка задающего воздействия. Традиционно требования к системе формируют заданием эталонного оператора системы, который определяет качество системы как переходных, так и в установившемся режимах при выполнении следующих условий [1, 9]:

- нулевая ошибка регулирования при подаче на вход сигнала вида $y(t) = 1(t)$;
- перерегулирование в системе, не превышающее допустимую, или должно быть нулевым;
- время переходного процесса не должно превышать допустимое;
- максимальное ускорение выходной переменной при заданных условиях не должно превышать допустимого значения.

Таким образом, оптимальным переходным процессом традиционно считают такой, который находится в пределах «коробочки» В.В. Солодовникова.

В предложенной теории оптимальный переходный процесс в системе задают в виде одной кривой (2 или 3), которая интегрально учитывает необходимые требования [9] и описывается передаточной функцией вида:

$$W_{\text{зд}}(p) = W_{y, x_{\text{зд}}}(p) = \frac{e^{-\tau_y p}}{(T_{\text{зд}} p + 1)^n}, \quad (1)$$

где $W_{y, x_{\text{зд}}}(p)$ – передаточная функция системы по задающему воздействию; p – оператор Лапласа; τ_y – условное запаздывания по каналу регулирующего воздействия; $T_{\text{зд}}$ – заданная постоянная времени инерционного звена n -го порядка, выполняющая функцию параметра оптимальной динамической настройки регулирующего устройства, численное значение которой зависит от максимально-допустимого значения регулирующего воздействия и допустимой скорости выходной переменной.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет так выбрать структуру системы управления и рассчитать численные значения $T_{\text{зд}}$, чтобы сразу обеспечить реализацию оптимального задающего графика переходного процесса без перерегулирования. Так, например, в [5] показано, что модернизация регуляторов температуры перегретого пара за котлом с использованием предлагаемой теории структурно-параметрической оптимизации динамических систем позволяет уменьшить время отработки задающего воздействия и крайнего внешнего возмущения в 2 раза по сравнению с типовым ПИД-алгоритмом регулирования, а использование при этом инвариантной системы автоматического регулирования (САР) при плановом изменении нагрузки сокращает максимальную динамическую ошибку регулирования при отработке крайнего внешнего возмущения расходом перегретого пара в 5,3 раза и уменьшить абсолютное значение интегральной ошибки регулирования в 10 раз.

Для оценки экономической эффективности внедрения инновационных технологий, основанных на предложенной теории, и очередности их внедрения, была разработана соответствующая методика применительно к САР технологических процессов тепловых электрических станций [10, 11]. Показано, что модернизация основных систем автоматического регулирования энергоблока мощностью 300 мВт, включая систему автоматического управления мощностью энергоблока, работающего в широком диапазоне изменения нагрузок от 30 до 100 %, обеспечит годовую экономию условного топлива на одном энергоблоке 858,2 т у.т. При этом ежегодная экономия топлива на четырех энергоблоках 300 мВт, суммарная мощность которых соответствует мощности 1200 мВт энергоблока АЭС, который планируется в Белорусской энергосистеме ввести в эксплуатацию в 2018 году, составит 3432,8 т у.т., что эквивалентно 892 450 у.е. в год при цене 1 т у.т. в 260 у.е., при этом суммарный годовой экономический эффект от внедрения инновационных технологий составит 1,45 млн у.е.

Решение задачи структурно-параметрической оптимизации динамических систем осуществляется по следующему алгоритму. На первом этапе аналитическим или экспериментальным путем с использованием разомкнутых, разомкнуто-замкнутых и замкнутых контуров определяется исходная динамика участков объекта регулирования, которую затем описывают соответствующей передаточной функцией без ограничения ее порядка и структуры. На втором этапе по передаточной функции объекта формируется заданная (не эталонная, как обычно) передаточная функция замкнутой САР по задающему воздействию, исходя из того, что реальный переходной процесс замкнутой САР всегда будет соответствовать заданному. Затем формируется структура регулирующего устройства на базе передаточной функции оптимального регулятора с использованием принципа динамической компенсации. При этом оптимальный оператор представляется как произведение обратной передаточной функции объекта на заданную (оптимальную) передаточную функцию разомкнутой системы. На этом этапе учитываются требования заказчика. Если необходимо оптимизировать отработку как внутренних, так и задающих воздействий, то вначале находят структуру стабилизирующего устройства внутреннего контура системы, затем – передаточную функцию эквивалентного объекта регулирования, учитывающего динамику внутреннего контура. На основе передаточной функции эквивалентного объекта формируется заданная передаточная функция внешнего контура системы по задающему воздействию основной регулируемой величины. Заданные передаточные функции внутреннего и внешнего контуров по задающему воздействию являются одновременно критериями оптимальности и содержат по одному параметру динамической настройки – заданную величину постоянной времени передаточной функции n -го порядка (вместо трех, как у ПИД-регулятора), которые выбирают по правилу золотого сечения с учетом максимальной величины регулирующего воздействия. При этом за целое принимают величину запаздывания по каналу регулирующего воздействия. «Техническое противоречие» между быстродействием и устойчивостью системы разрешается использованием линейного, модернизированного или комбинированного упредителя Смита. Для существенного улучшения на заключительном этапе синтеза оптимальной структуры САР в замкнутый контур системы добавляют устройство компенсации эквивалентного внешнего возмущения.

Предложенный метод структурно-параметрической оптимизации динамических систем позволяет повысить быстродействие системы при отработке скачка задания по сравнению с ПИД-регулятором в 3–4 раза и уменьшить с использованием принципа инвариантности значение линейной интегральной ошибки регулирования при отработке крайнего внешнего возмущения до 10 раз по сравнению с типовой двухконтурной САР при плановом изменении нагрузки.

Литература

1. Егунов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т. 2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. М., 2000.
2. Кузьмицкий И.Ф., Кулаков Г.Т. Теория автоматического управления: учеб. Минск, 2010.
3. Коновалов М.А. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов. К., 2009.
4. Демченко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М., 2009.
5. Кулаков Г.Т. // Матер. XVII МНПК «Проблемы и перспективы инновационного развития экономики»/ Киев-Симферополь-Алушта, 2012 г. С. 252–254.
6. Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Кухоренко А.Н. // Матер. II МНПК «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино-и приборостроении». Минск, 2013. С. 21–22.
7. Кулаков Г.Т., Кравченко В.В. // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2012. № 2. С. 40–45.
8. Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Корзун М.Л., Басалай Д.В. // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2012. № 3. С. 67–71.
9. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами. М., 1993.
10. Кулаков Г.Т., Кравченко В.В., Макоско Ю.В. // Наука и техника. Международный научно-технический журнал. 2012. № 5. С. 92–97.
11. Кулаков Г.Т. // Наука и техника. Международный научно-технический журнал. 2013. № 2. С. 77–82.