

Ш. Е. ШТЕЙНБЕРГ, И. Е. ЗАЛУЦКИЙ
(ЦНИИКА), Л. П. СЕРЕЖИН,
И. Г. ВАРЛАМОВ (Техноконт)

Настройка и адаптация автоматических регуляторов. Инструментальный комплект программ

Обсуждаются основные проблемы качественной работы САР. Предлагаются новые методы расчета параметров автоматических регуляторов в замкнутых (действующих) системах регулирования. Предлагаемые методы используют для расчета оптимальных параметров настройки только записи переходного процесса в ненастроенной замкнутой системе регулирования. Приводятся краткие сведения о комплекте инструментальных программ для выполнения таких расчетов на РС.

The paper discusses the problems of qualitative automatic control system operation. It offers new methods of automatic controller parameters calculation in closed loops. The techniques proposed use for calculating optimal tuning parameters only transient records in untuned closed-loop system. Brief notes about the software tools for PC-based calculations are also included.

Задача настоящей статьи – ознакомление с новой технологией настройки и инструментальными средствами для ее осуществления, используемыми для различных модификаций САР. В работе [1] рассмотрен модуль адаптации (МА) для ПИ регуляторов, построенный на этой технологии. В этой статье рассматриваются разновидности методов, построенных на этой технологии, и разрабатываемый ЦНИИКА и Техноконт комплект программ, реализующий задачи этой технологии.

Основная цель разработки – упростить процедуру настройки. Это упрощение должно сократить время, затрачиваемое наладчиками на настройку САР, а также исключить необходимость нарушения технологического режима установки, свойственную другим известным методам. Так, использование новой технологии должно исключить необходимость проведения специальных испытаний, связанных с отключением регуляторов.

Еще более длительны, трудоемки и неудобны технологическому персоналу процедуры настройки, построенные на выведении замкнутой САР в режим незатухающих колебаний или автоколебаний. Перенастройка контуров в системах не должна быть связана с технологическим персоналом и требовать от наладчиков существенных затрат времени. Качественная работа САР – основной источник промышленной безопасности, дол-

говечности и экономических показателей эксплуатации агрегата. Однако в большинстве случаев разного рода переключения, изменения характеристик сырья и поступающих материалов изменяют характеристики объекта и, следовательно, требуют перенастройки систем. Следует учитывать значительный объем эксплуатируемого оборудования (на современных электростанциях приблизительно 600 – 800 контуров, или примерно 40-50 контуров на штатную единицу).

Технология настройки регуляторов, рассматриваемая в предлагаемой статье, предназначена для автоматизации работ по наладке новых САР и эксплуатации действующих. Создание этой технологии в значительной степени отвечает поставленным выше требованиям:

- сокращаются затраты времени на настройку;
- исключается необходимость привлечения технологического персонала к испытаниям, предшествующим настройке;
- исключается необходимость выведения САР в специальные режимы, регламентирующие возможность настройки.

В дальнейшем для обозначения этой технологии будет применяться аббревиатура ТПЗС (Технология Перенастройки Замкнутых Систем).

Основное свойство ТПЗС – использование в качестве входной информации для нахождения оптимальных настроек переходных процессов, проходящих в замкнутой САР. Эти процессы могут быть получены как при плохо настроенной системе регулирования, так и при настройках, удовлетворяющих операторов. Процессы записываются при ступенчатых возмущениях по нагрузке или заданию. Запись величины и времени нанесения возмущения не требуется.

Эти переходные процессы могут быть извлечены из архивов данных нормальной эксплуатации, но, конечно, они могут быть получены и при специальных испытаниях. Но эти испытания не требуют ни отключения, ни перенастройки САР. Стало быть, наиболее экономны с точки зрения затрат времени и организации.

Заметим, что процедура предварительной идентификации в разомкнутом контуре с помощью кривых разгона, импульсных или частотных характеристик для промышленных объектов, в большинстве случаев имеющих перекрестные связи между контурами, методически неверна и может привести к значительным ошибкам. ТПЗС рассчитывает настройки с учетом влияния других контуров. Далее это утверждение будет рассмотрено подробнее и проиллюстрировано экспериментально.

Программные средства, построенные на этой технологии, обеспечивают настройку регуляторов как в автоматическом режиме (автоматические адаптивные системы регулирования), так и при настройке с участием наладчика (первичной и для перенастройки в процессе

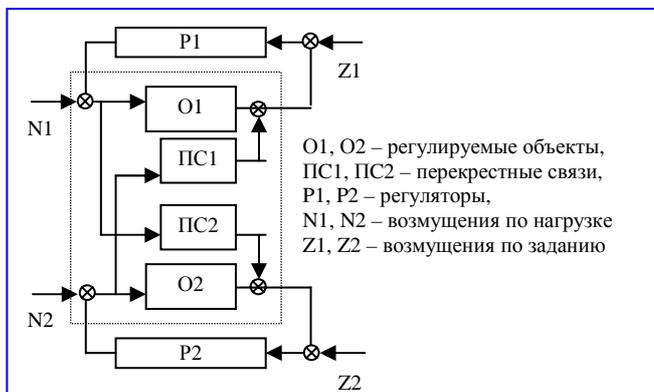


Рис. 1. Двухконтурная система регулирования

эксплуатации). Эти программные средства и разработанные методики создают условия для оптимальной настройки различных модификаций систем регулирования (одномерных, каскадных, многомерных, с импульсом из промежуточной точки, многоимпульсных и других). Далее приводятся описания методик и программ, разработанных на основе ТПЗС.

Методы расчета, используемые в ТПЗС

Как было сказано выше, основной принцип ТПЗС – использование в качестве входной информации переходных процессов, проходящих в замкнутой САУ. В отличие от известных методов настройки, построенных на результатах испытаний замкнутой системы, ТПЗС не требует специальных режимов функционирования системы, например, выведения в режим незатухающих колебаний, или специальных законов регулирования. По сравнению с методами, построенными на технологии предварительной идентификации в разомкнутом контуре с помощью кривых разгона, импульсных или частотных характеристик, ТПЗС, наряду с экономией времени и получением информации без нарушения обычных условий эксплуатации технологического оборудования, имеет еще одно важное преимущество. Оно заключается в том, что переходные процессы, на основе которых осуществляется расчет настроек, содержат все полюсы собственного движения замкнутой системы, в том числе и порождаемые сложной структурой объекта, включенного параллельно с регулируемым каналом [2].

Поскольку процесс записан при действующих, настраиваемом и других контурах, то и характеристики объекта, используемые ТПЗС, содержат информацию не только о канале объекта, идентифицируемом при размыкании системы, а о действительно регулируемом объекте, для которого и нужно искать оптимальные настройки. Проиллюстрируем сказанное примером. Пусть, например, на двухмерном объекте работает двухконтурная система регулирования. Структура такой системы изображена на рис. 1. К регулятору P1 подключен вовсе не объект O1, а достаточно сложная структура [2] с передаточной функцией, содержащей все элементы структуры рис. 1, включая и регулятор P2. Аналогичные суждения справедливы и для регулятора P2. Поэтому при наличии перекрестных связей настройка регулятора P1 по математическому описанию O1, как обычно рекомендуется при независимой настройке контуров, методически неверна. В зависимости от конкретных характеристик объектов и регуляторов ошибки настройки и качества процессов могут быть достаточно велики.

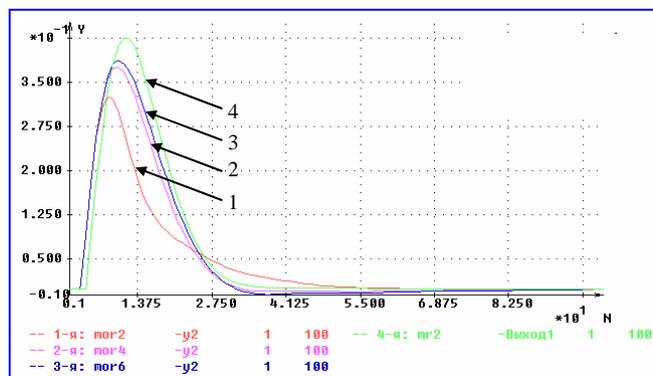


Рис. 2. Оптимальные переходные процессы в одном из контуров двухмерной системы

Решение задачи ограниченного синтеза двух – пятимерных систем при известных передаточных функциях приведено в работе [2]. Но идентификация отдельных каналов в многомерных системах – сложная трудоемкая задача, которую при использовании ТПЗС для настройки регуляторов решать не нужно. Разумеется, если перекрестная связь PC1 к настраиваемому контуру очень мала по сравнению с связью через O1, то ее влиянием можно пренебречь.

Но на промышленных агрегатах практически всегда имеются существенно зависимые контуры. Например, контур, регулирующий расход сырья или продукта, так же сильно связан с температурой изготавливаемого продукта, как и контуры регулирования горения или расхода нагревающего (охлаждающего) агента.

Для иллюстрации поведения систем регулирования при наличии перекрестных связей на рис. 2 приведены переходные процессы, полученные на инструментальном комплексе ПС-3 [3].

Процесс 1 – процесс в двухмерной системе. Параметры настройки регулятора оптимальны для объекта без перекрестных связей.

Процесс 2 – процесс в двухмерной системе. Оптимальные параметры настройки регулятора рассчитаны по второй методике ТПЗС (см. ниже).

Процесс 3 – процесс в двухмерной системе. Оптимальные параметры настройки регулятора рассчитаны по первой методике ТПЗС (см. ниже).

Процесс 4 – процесс в одномерной системе. Параметры настройки регулятора оптимальны для одномерного объекта, аппроксимированного уравнением первого порядка с запаздыванием. Параметры этого объекта рассчитаны по второй методике ТПЗС.

Как и следовало ожидать, по заданному критерию (минимум времени переходного процесса) процесс, рассчитанный по истинным характеристикам регулируемого канала без учета перекрестных связей, хуже процессов, рассчитанных с помощью ТПЗС. Разница между процессами 3 и 4 иллюстрирует ошибку аппроксимации действительного двухмерного объекта его аппроксимацией моделью первого порядка с запаздыванием.

На основе ТПЗС разработаны алгоритмы, решающие задачи настройки автоматических регуляторов. Эти алгоритмы создавались с помощью двух различных методик, каждая из которых соответствует ТПЗС, но различаются используемыми алгоритмами и вводимой информацией. Различаются они также и сегодняшней областью возможного использования с точки зрения подготовленных в настоящее время алгоритмов и проведенных испытаний по видам САУ и их элементов.

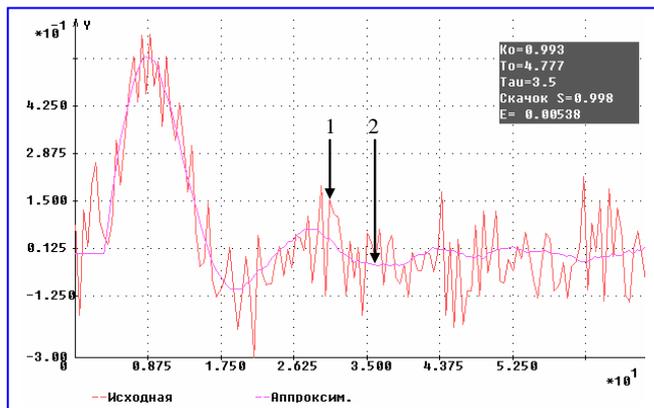


Рис. 3. Переходные процессы в замкнутой системе регулирования: 1 – исходный процесс с шумом, введенным на выходе объекта; 2 – смоделированный процесс, параметры объекта найдены при идентификации исходного процесса

Классификация, используемая при планировании разработки, выглядит следующим образом:

- разновидности САР (одномерная, каскадная, многомерная, многоимпульсная);
- разновидности аппроксимации моделей объекта (наличие и отсутствие самовыравнивания, порядок аппроксимации, наличие в собственном движении объекта комплексных полюсов);
- разновидности законов регулирования (П, ПИ, ПИД);
- виды выдаваемой пользователю дополнительной информации (параметры модели объекта, графическое сопоставление исходного переходного процесса с рассчитанными по полученной модели, численное значение ошибки и т.п.).

В созданных на основе ТПЗС программах используется как *показатель качества интервал времени переходного процесса*. Рассчитанные оптимальные параметры настройки обеспечивают минимум этого времени. Как показали проведенные исследования, минимизация этого показателя позволяет получать переходные процессы с незначительным перерегулированием (не более 5 % от выбега). Выбег этих процессов обычно несущественно превосходит выбег процессов, оптимальных по этому показателю. Существенным преимуществом этого показателя качества является также сравнительно небольшое число реверсов ИМ.

В составе ТПЗС в настоящее время разработаны 2 методики, существенно различающиеся алгоритмами, видами входной информации и другими показателями.

Первая методика базируется на алгоритмах расчета параметров настройки на основе анализа только регулируемой переменной и значений параметров настройки, установленных на регуляторе при его записи. Параметры настройки исходного процесса могут быть произвольными, но должны обеспечивать устойчивость САР. В дальнейшем для обозначения этой методики будет использоваться аббревиатура МПП – методика преобразования переходных процессов.

Суть разработки МПП состояла в выявлении характерных точек переходного процесса и аппроксимации зависимости между их координатами и качеством регулируемого процесса аналитическими выражениями. Число вводимых точек зависит от типа процесса, но не больше 7. В отличие от второй, эта методика не требует ввода в программу всего интервала переходного про-

цесса. Для обработки достаточен участок записи регулируемой переменной, содержащий 6 интервалов ее изменения от 0 до первого экстремума.

Созданные к настоящему времени по методике МПП алгоритмы и программы предназначены только для ПИ регуляторов. Входная информация для настройки – только переходный процесс регулируемой переменной и установленные параметры ПИ регулятора. Выходная информация – только оптимальные параметры ПИ регулятора.

Часто на промышленных агрегатах на кривые переходных процессов наложены помехи, искажающие поведение регулируемой переменной. Эти помехи могут быть следствием собственного движения измерительных устройств или колебаний регулируемой переменной, обусловленных неравномерной работой различных механизмов агрегата (например, питатели сырья, реагентов, топлива и т.п.). На рис. 3 приведены переходные процессы с помехами высокого уровня. В таких случаях программа представляет пользователю возможность проверить правильность расстановки точек на кривой или самому ввести эти значения. В этом последнем случае ввод записи переходного процесса не нужен. При введенном переходном процессе пользователю представляется возможность с помощью графического редактора скорректировать положение точек в экстремумах переходного процесса и значения ординат в задаваемые программой моменты времени.

На базе МПП созданы программные модули для настройки ПИ регуляторов для различных структур систем регулирования: одноконтурных, каскадных, двухмерных систем с перекрестными связями в объекте.

На основе МПП построен также МА к ПИ регулятору [1].

Основные отличия алгоритмов МА от алгоритмов разовой настройки:

- автоматический (без участия человека) выбор из поступающей на вход МА непрерывной реализации участка с переходным процессом;
- автоматическая (без участия человека) коррекция параметров ПИ регулятора;
- более “осторожные” (меньшие) изменения настроек на каждом шаге адаптации регулятора.

Вторая методика также построена на ТПЗС, но, в отличие от первой, предусматривает предварительную идентификацию параметров модели объекта и расчет параметров настройки на основе полученной модели. Эта методика в дальнейшем будет обозначаться аббревиатурой МНПО – методика расчета параметров настройки с предварительной идентификацией параметров модели объекта. Входная информация МНПО должна, как и в МПП, содержать участок с переходным процессом регулируемой переменной, но программы МНПО не требуют ввода параметров настройки регулятора при записи исходного процесса. Однако в эти программы необходимо ввести дополнительно запись положения ИМ (регулирующего органа) на том же участке времени. Структура модели объекта задается в виде уравнения первого порядка с запаздыванием. Наличие или отсутствие самовыравнивания программы распознают автоматически, выдавая в соответствующей форме результаты параметрической идентификации. Проведенные испытания показали, что параметрическая идентификация объекта в замкнутых системах выполняется с высокой точностью даже при наличии сильного шума. Иллюстрацией этого утверждения может служить рис. 3. Найденные параметры модели объекта

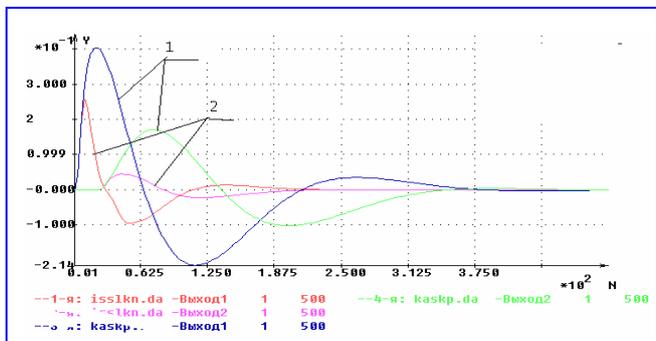


Рис. 4. Переходные процессы в каскадной системе регулирования: 1 – исходные настройки (первый и второй контуры); 2 – оптимальные МНПО настройки (первый и второй контуры)

приведены на рисунке в правом углу. Истинные значения этих параметров: $K_o=1$, $T_o=5$, $T_{au}=3.5$. Идентификация объекта с меньшим шумом или без шума уменьшает ошибку идентификации. Результаты идентификации того же объекта при отсутствии шума:

$K_o=0,994$, $T_o=4,925$, $T_{au}=3,5$, $E(\text{ошибка}) = 0,000001$.

Программы МНПО позволяют рассчитать оптимальные параметры настройки любых стандартных законов регулирования – П, ПИ, ПИД при заданных пользователем значениях шага управления, установленного в контурах регулирования.

Эти расчеты могут быть выполнены для регуляторов с разными выбранными зонами нечувствительности, но в этом случае значения оптимальных параметров настройки будут зависеть от величины входного воздействия исходного процесса.

Наряду с расчетом настроек регуляторов в одноконтурных системах регулирования, созданные на основе МНПО программы позволяют рассчитать оптимальные параметры двух регуляторов каскадной САР. Для каскадной схемы в качестве входной информации для расчета в программу нужно ввести записи регулируемых переменных на выходе первого и второго объекта и положение регулирующего органа в первом (быстром) контуре. Законы регулирования (П, ПИ, ПИД) назначает пользователь. На рис. 4 приведены графики регулируемых переменных для исходных (1) и найденных МНПО оптимальных (2) настроек в каскадной системе.

Расчет параметров с помощью МПП выполняется за один шаг расчета, если время процессов регулирования первого и второго контура существенно различны. В противном случае для настройки каскадной схемы МПП следует использовать 2, иногда даже 3 итерации.

Результаты расчета одного из регуляторов двухмерной системы по методикам МПП и МНПО приведены на рис. 2 (график – МНПО, 3- МПП). Однозначного заключения о превосходстве какой-либо методики при настройке многомерных систем пока сделать нельзя.

По желанию пользователя программы МНПО представляют ему результаты дополнительных сервисных расчетов:

- параметры модели объекта, полученные при идентификации, или параметры аппроксимационной модели объекта для каждого регулятора для многоконтурной системы регулирования;
- результаты имитационного моделирования с сопоставлением графиков поведения САР при различных настройках для найденной модели объекта.

Функциональные возможности разработанных в мае 2003 г. программ, созданных на основе МПП и МНПО, сопоставлены в приведенной ниже таблице.

Таблица отражает сегодняшнее состояние разработки. Преимущества той или иной методики могут изменяться по мере совершенствования алгоритмического обеспечения каждой из них.

Сопоставление функциональных возможностей ПО МПП и МНПО

Наименование функции	МПП	МНПО
Расчет оптимальных параметров настройки для различных законов регулирования.	Только ПИ	П, ПИ, ПИД
Изменение при расчете оптимальных параметров настройки шага управления и/или зоны нечувствительности, по сравнению с записанным исходным процессом.	Нет	Да
Расчет оптимальных параметров настройки в каскадных системах регулирования.	Да (возможны 2-3 итерации)	
Расчет оптимальных параметров настройки двух- и многомерных систем с перекрестными связями.	Да	Границы области использования принятой аппроксимационной модели не определены
Моделирование переходных процессов с различными найденными настройками и параметрами объекта. Расчет оптимальных настроек с разными критериями качества, сравнение процессов при разных настройках.	Нет	Да
Автоматическая адаптация параметров ПИ-регулятора к изменению характеристик объекта в РВ.	Да	Нет

Заключение

- Стабильная качественная работа САР на промышленных агрегатах – основа промышленной безопасности и экономических показателей, обеспечиваемых АСУТП. Для удовлетворительной работы регуляторов необходима достаточно частая их настройка, поскольку характеристики регулируемого объекта обычно существенно и часто изменяются. Поэтому для качественной работы САР в эксплуатации необходима их автоматическая адаптация или достаточно частая настройка регуляторов.

- Методы настройки, известные из литературы, можно разделить на две группы. *Первая группа* обуславливает необходимость размыкания САР и проведения идентификации регулируемого объекта при отключенных регуляторах с помощью разного вида воздействий. *Вторая* – требует введения замкнутых систем регулирования в специальные режимы работы, весьма неудобные технологическому персоналу. *Обе группы* требуют существенных затрат времени, причем необходимо привлечение к настройке технологического персонала.

- Настройка регулятора с помощью модели объекта, идентифицированной в разомкнутой системе, методически неверна и может привести к неприемлемым результатам.

- В статье предлагается технология настройки (ТПЗС) – свободная от недостатков, свойственных рассмотренным ранее группам методов.

ТПЗС основана на расчете оптимальных настроек по записям переходных процессов (исходный процесс) в

замкнутой системе регулирования при произвольных настройках. Переходные процессы должны быть получены в результате ступенчатого воздействия по нагрузке или заданию. Значение величины воздействия и момент его нанесения для расчета не нужны. Такие воздействия на объект обычно часто имеют место при нормальной эксплуатации на промышленных установках.

- В рамках ТПЗС авторами разработаны 2 различных методики, решающих названные задачи. Эти методики различаются алгоритмами решения, деталями и объемами входной и выходной информации. Первая (МПП) основана на найденных приближенных аналитических зависимостях между координатами характерных точек исходного процесса и изменениями настроек, обеспечивающими переход системы к оптимальным процессам. Вторая (МНПО), обрабатывая исходные переходные процессы, находит параметры аппроксимационной модели регулируемого объекта, минимизируя норму расстояния между этим процессом и его моделью при том же входе. Расчет настроек осуществляется для найденной модели объекта оптимизацией заданного показателя качества САР. В разработанных программах принят как показатель качества минимум времени переходного процесса. По мнению авторов, этот показатель наиболее полно отвечает требованиям эксплуатации промышленных установок, несущественно изменяя оптимальные значения других показателей.

- Различия между МПП и МНПО применительно к одноконтурной системе по входной информации:

- МПП – запись регулируемой переменной исходного процесса (возможен ввод участка этого процесса);
- значения установленных параметров настройки при записи исходного процесса;
- МНПО – запись регулируемой переменной исходного процесса;
- запись положения регулирующего органа (ИМ) исходного процесса на том же интервале времени.

Выходная информация программ, составленных по МНПО, наряду с рассчитанными оптимальными параметрами может по желанию пользователя сообщить параметры найденной аппроксимационной модели и сопоставить графики исходного процесса и его найденной модели.

- В программах, разработанных для обеих методик, содержатся специальные алгоритмы, позволяющие избежать появления грубых ошибок расчета при больших помехах, воздействующих на замкнутую систему, и даже при значительных отклонениях входного воздействия от ступенчатой формы.

- Разработанные программы с помощью специальных методик или отдельных программных модулей приспособлены для расчета настроек в одноконтурных, каскадных, многомерных системах.

*Шолом Ефимович Штейнберг – д-р техн. наук, проф.,
главный научн. сотрудник, Илья Евсеевич Залуцкий – канд.
техн. наук, ведущий научн. сотрудник ЦНИИКА.*

Телефон (095) 240-05-47.

E-mail: sniica@sniica.ru

*Леонид Павлович Серезин – генеральный директор, Илья
Геннадьевич Варламов – инженер НПО “Техноcont”.*

(095) 962-91-60.

E-mail: info@technocont.ru

http://www.technocont.ru

Список литературы

1. Штейнберг Ш.Е., Залуцкий И.Е. Адаптация стандартных регуляторов к условиям эксплуатации в промышленных системах регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2003. №4.
2. Штейнберг Ш.Е., Кленов Б.Б. Настройка параметров стандартных регуляторов в многомерных системах регулирования // Там же. 1999. № 6.
3. Штейнберг Ш.Е. Программный пакет ПС-3 // Приборы. 2001. № 2.