



АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,
д. т. н., проф. каф.
систем автоматического управления
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Работа является продолжением цикла статей, посвященных истории автоматического управления. В ней рассмотрено необычное поведение регуляторов, обнаруженное при массовой эксплуатации первых паровых машин при различных применениях. Это выявило проблему устойчивости регулятора, вызванную противоречием между требованиями точности и сложной динамикой процессов, протекающих в замкнутом контуре регулирования.

ПРОБЛЕМА УСТОЙЧИВОСТИ ПЕРВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

XIX век начался как век пара, что стало особенно явственно после вхождения в жизнь паровозов и пароходов. С началом первого регулярного железнодорожного сообщения в 1830 г. на Манчестерско-Ливерпульской дороге протяженность железнодорожных путей в Англии достигла 6 600 миль к 1852 г. и 19 000 миль к концу века [1]. Однако паровая машина была агрегатом повышенной опасности, особенно на пароходах, где часто случившиеся в те времена взрывы машины приводили, как правило, к гибели всего корабля с экипажем и пассажирами. Красочное описание связанных с этим ужасных трагедий можно найти в обзоре [2], где, в частности, со ссылкой на журнал «Морской сборник» № 7 за 1892 г. сообщалось: «В Англии с 1810 по 1870 гг. произошло 936 взрывов судовых паровых котлов, при которых погибли 1615 человек и 2092 человека получили тяжелые ранения. В США с 1857 по 1873 гг. произошло 157 взрывов

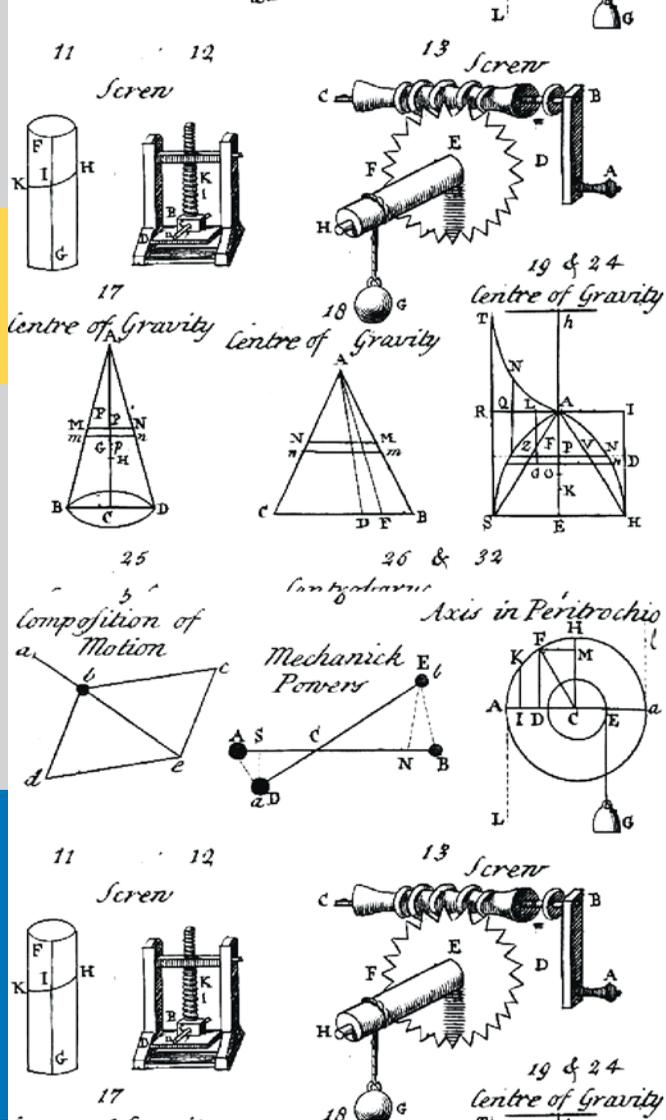
судовых паровых котлов, сопровождавшихся гибелью людей. В среднем приходилось по одному взрыву на 305 котлов».

Иногда аварии паровых машин были связаны с неудовлетворительной работой регуляторов, описанных в предыдущей статье нашего цикла [3]. Типичными дефектами таких регуляторов, которых в середине XIX в. в одной только Англии работало 75 тыс., были «самораскачивание» скорости вращения выходного вала, приводящее к разному машин, либо «рыскание», т. е. неустойчивые автоколебания скорости [4, 5, 6]. Более того, развитие технологии производства паровых машин, связанное с более точным изготовлением, снижением трения, повышением чувствительности регуляторов, привело к совершенно противоположному эффекту — ухудшению их работоспособности. В комментариях академиком А. А. Андропова и И. Н. Вознесенского к работам Максвелла, Вышнеградского и Стодоль отмечалось:

«Центробежные регуляторы, построенные по принципу регулятора Уатта, честно работали во времена Уатта и в начале XIX в. К середине XIX в. все чаще отмечались трудности при наладке регуляторов, случаи неустойчивости и случаи генерации колебаний. Технические журналы 60-х годов прошлого века содержат описания многочисленных случаев такого рода и жалобы на отсутствие надежно действующих регуляторов» [6].

Ученые вынуждены были в этом разбираться, в результате чего была сформулирована научная *проблема устойчивости регулятора*. В связи с полным отсутствием понимания и теоретических представлений о динамических процессах в замкнутых контурах регулирования разработчики паровых машин вынуждены были опираться только на опыт их эксплуатации и результаты длительных и трудоемких работ по настройке и испытаниям.

Первым, кто понял и попытался теоретически рассмотреть пробле-

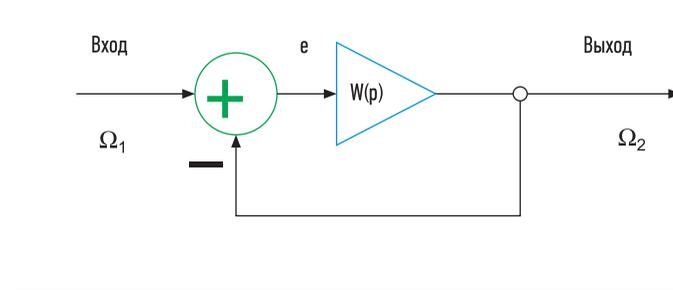


му устойчивости, был английский математик и астроном Джордж Эри (George B. Airy), построивший в 1840 г. телескоп с автоматическим приводом по азимуту и углу места с центробежным фрикционным регулятором, описанный в предыдущей статье нашего цикла [3]. Эри был первым, кто предложил использовать дифференциальные уравнения для описания работы регулятора в составе привода. Записав нелинейные дифференциальные уравнения и используя знакомые ему из небесной механики методы теории возмущений орбит планет, Эри нашел приближенное решение и пришел к выводу, что без учета трения исследуемый регулятор скорости неустойчив, что приводит к наблюдаемому на практике явлениям «самораскачивания» и «рыскания» [4, 6, 7, 8]. Однако Эри не удалось найти условия, связывающие устойчивую работу регулятора с его конструктивными параметрами. Удовлетворительной работы привода телескопа Эри смог добиться, только применив кагаракт — устройство тахометрической обратной связи [3].

В чем же сущность проблемы устойчивости?

С одной стороны, главное требование к любому регулятору — это высокая точность работы, т. е. малая ошибка в поддержании регулируемого параметра, в данном случае скорости вращения машины. Собственно, регулятор и ставится там, где человек не может справиться с регулируемым процессом или не может сделать это достаточно точно. Было замечено, что точность работы регулятора повышается с увеличением его коэффициента усиления. Это означает, например, что в регуляторе Уатта заслонка становится более чувствительной к изменению скорости машины, т. е. поворачивается на больший угол при меньшей величине ошибки по скорости или, как тогда говорили, меньшем «коэффициенте неравномерности» регулятора. Это достигалось экспериментальным подбором механических параметров чувствительного элемента и размеров соединительных тяг.

Однако чрезмерное повышение коэффициента усиления регулятора приводило к нарушению его нормальной работы: скорость машины начинала колебаться, машина могла остановиться или,



наоборот, идти вразнос, т. е. ее скорость катастрофически нарастала вплоть до разрушения конструкции. Такой процесс стали называть нарушением (или потерей) устойчивости регулятора.

В популярном английском практическом руководстве по проектированию паровых машин 1853 г. [9] указывалось, что вариацию скорости большинства машин редко удается снизить до 10% от среднего значения, хотя настройки регулятора допускают снижение этого параметра до 3%. Однако последнее, как правило, приводило к неудовлетворительной работе машины.

Таким образом, проблема устойчивости — это, прежде всего, принципиальное противоречие между требованиями точности и сложной (возможно, нелинейной) динамикой процессов, протекающих в замкнутом контуре. Другими словами, это противоречие между требованиями к статическим и динамическим характеристикам замкнутой системы.

В современной терминологии это противоречие можно проиллюстрировать на примере простой линейной системы регулирования скорости массивного механического объекта с электродвигателем, структурная схема которой показана на рис. 1, где: Ω_1 — задание скорости; Ω_2 — фактическая скорость объекта; e — ошибка регулирования скорости; $W(p)$ — передаточная функция разомкнутой системы, равная

$$W(p) = \frac{K}{(T_m p + 1)(T_s p + 1)}$$

Здесь T_m и T_s — электромеханическая и электромагнитная постоянные времени электродвигателя соответственно, K — коэффициент передачи разомкнутой системы.

Для оценки устойчивости системы выберем общепринятый показатель колебательности $M \geq 1$ [10]. При

$M = 1$ переходный процесс апериодический (без колебаний), при $M \geq 4$ переходный процесс становится сильно колебательным, и на практике система может потерять устойчивость за счет влияния малых постоянных времени, не учтенных в математической модели. Обычно для нормальной работы регулятора выбирают $M \leq 2$.

На рис. 2 показана расчетная зависимость показателя колебательности от ошибки системы регулирования скорости при следующих параметрах:

$$\Omega_1 = 10 \text{ град/с}; T_m = 1 \text{ с}; T_s = 0,1 \text{ с}.$$

Из рис. 2 следует, что уменьшение ошибки, например ниже 0,2 град/с, приводит к явному ухудшению и даже потере устойчивости системы (увеличению ее колебательности).

Таким образом, наличие проблемы устойчивости первых регуляторов потребовало ее теоретического осмысления. Наибольший вклад в разрешение этой проблемы внесли классики теории автоматического регулирования: Джеймс Кларк Максвелл (James Clerk Maxwell), Иван Алексеевич Вышнеградский и Аурель Стодола (Aurel Stodola), работы которых будут подробнее рассмотрены в следующей статье. В отличие от Эри, они использовали по предложению Максвелла мате-

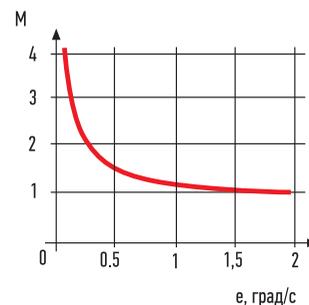


РИС. 1. Система регулирования скорости

РИС. 2. Показатели системы регулирования скорости

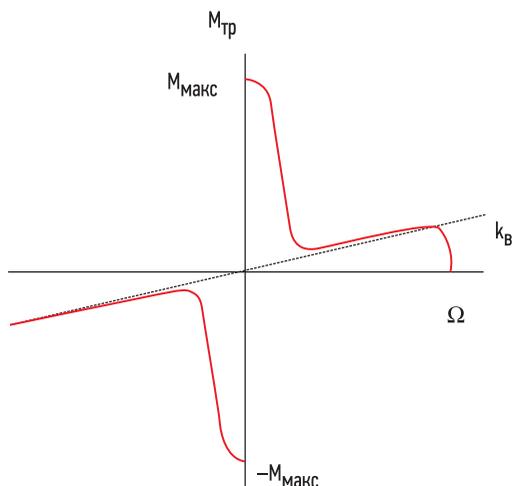


РИС. 3. ▲
Модель Герси —
Штрибека

матическое описание регулятора в виде линейных дифференциальных уравнений, что предполагало наличие линейных зависимостей для всех его параметров либо линеаризацию нелинейных зависимостей при малом отклонении от положения равновесия.

Однако для некоторых видов нелинейностей такой подход не давал удовлетворительного результата, поскольку реальное поведение регулятора могло сильно отличаться от расчетного. Таким образом, было обнаружено, что наличие элементов с нелинейной связью между параметрами также таит опасность потери устойчивости регулятора.

Характерным примером таких «опасных» элементов являются опоры и подвижные механические звенья с трением, присутствующие в любом регуляторе [6, 8]. С эффектом автоколебаний за счет трения во фрикционном регуляторе как раз и столкнулся Эри при наладке привода телескопа.

Общая математическая модель механического трения в опоре отсутствует до сих пор. На рис. 3 показана так называемая модель Герси — Штрибека зависимости момента трения $M_{тр}$ от скорости вращения вала Ω , предложенная немецким ученым Рихардом Штрибеком (Richard Stribeck) в 1902 г., где $M_{макс}$ — момент трогания [11].

Частными случаями этой модели могут быть модель вязкого трения ($M_{тр} = k_v \Omega$, где k_v — коэффициент вязкого трения) или модель сухого (кулоновского) трения по закону

Амонтона — Кулона, предложенного французским военным инженером и академиком Шарлем Кулоном (Charles-Augustin de Coulomb) в 1875 г.:

$$M_{тр} = M_{макс} \text{ sign } \Omega,$$

где величина момента трения $M_{макс}$ не зависит от скорости вращения.

В регуляторах присутствуют и другие нелинейности. Так, в центробежном чувствительном элементе Уатта центробежная сила пропорциональна квадрату скорости; нелинейной является расходная характеристика заслонки; золотник паровой машины имеет зону нечувствительности и т. д.

Вопрос нелинейности многие исследователи решали очень просто. Если нелинейностью нельзя пренебречь, то ее заменяли подходящей в каком-то смысле линейной зависимостью. Например, начиная с Максвелла характеристику трения на рис. 3 представляли в виде вязкого трения. Эта процедура была названа линеаризацией нелинейности при малых отклонениях от положения равновесия. Однако, как отмечено выше, такой подход не применим к некоторым видам нелинейностей, которые называются существенными. Общее решение вопроса нелинейностей было предложено нашим соотечественником Александром Михайловичем Ляпуновым, работы которого будут также рассмотрены в последующих статьях.

Таким образом, широкое применение паровых машин с центробежными регуляторами скорости к середине XIX в. показало следующее:

- При определенных настройках и конструктивных изменениях регулятора, например с целью повышения точности его работы, обнаруживаются странные явления «рыскания», т. е. существенных колебаний скорости и «самораскачивания» машины, приводящие к ее разному, вызывающему аварии.
- Отсутствие ясности и каких-либо теоретических представлений о динамических процессах, происходящих в регуляторе и паровой машине, не позволяло решить проблему устойчивости регулятора.

- Первым, кто попытался теоретически разобраться в этой проблеме, был Эри, применивший аппарат дифференциальных уравнений и обнаруживший ключевую роль трения в достижении устойчивой работы регулятора.
- Экспериментальные данные показали, что потеря устойчивости регулятора вызывается двумя основными факторами: чрезмерным повышением коэффициента усиления регулятора с целью снижения установившейся ошибки регулирования и наличием в контуре регулирования существенных нелинейностей.

Накопленный к середине XIX в. опыт эксплуатации и многочисленные экспериментальные наблюдения регулируемых паровых и других машин создали хорошие предпосылки для появления первых фундаментальных работ теории автоматического регулирования, выполненных во второй половине XIX в. Максвеллом, Вышнеградским, Стодолой и Ляпуновым, которые будут рассмотрены в последующих статьях. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Susman H. I. Victorian technology. Invention, innovation, and the rise of machine. Santa Barbara, California: ABC-CLIO, LLC, 2009.
2. Персональный сайт МОРЕМХОД. Пароходы в огне...1 часть. <http://moremhod.info/index.php/library-menu/24-v-mire-interesnogo/128-2010-11-13-11-09-21?showall=1&limitstart>
3. Микеров А. Г. Первые регуляторы паровых машин // Control Engineering Россия. 2014. № 4 (52).
4. Bennet Stuart: A brief history of automatic control. <http://userspages.uob.edu.bh/ebrgalla/f/00506394.pdf>
5. Dennis S. Bernstein. Feedback Control: an invisible thread in the History of Technology // IEEE Control Systems Magazine. April, 2002.
6. Максвелл Д. К., Вышнеградский И. А., Стодолой А. Теория автоматического регулирования (линеаризованные задачи) / Под ред. А. А. Андропова и И. Н. Вознесенского. М.: Изд-во АН СССР. 1949.
7. Bissell C.C. History of Automatic Control. http://siamun.weebly.com/uploads/4/1/7/3/4/173241/history_of_automatic_control.pdf
8. Айзерман М. А. Краткий очерк становления и развития классической теории регулирования и управления // Автоматика и телемеханика. 1993. № 7.
9. Treatise on the steam engine in its application to mines, mills, steam navigation, and railways / Edited by John Boume. London: Longman, Brown, Green and Longmans. 1853.
10. Бесенерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука. 1975.
11. Большая энциклопедия нефти и газа. www.ngpedia.ru/id276987p1.html