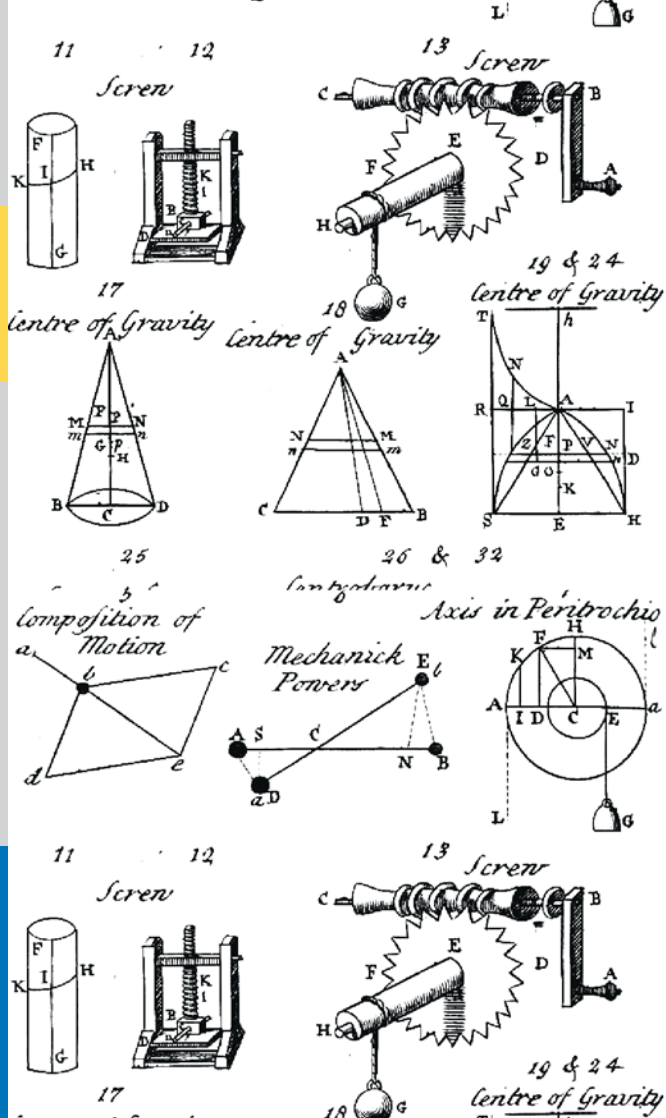




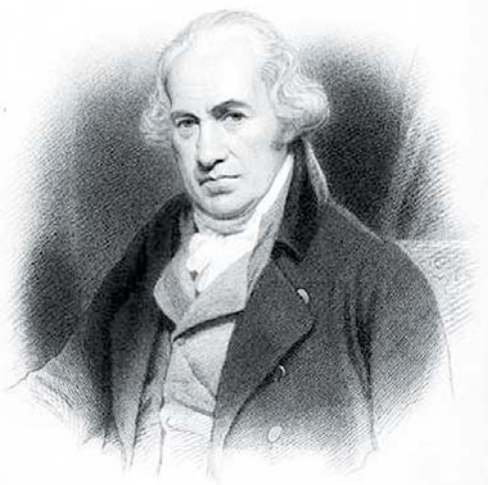
**АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,**  
д. т. н., проф. каф.  
систем автоматического управления  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Данная работа продолжает цикл статей, посвященных истории автоматического управления техническими системами. В ней рассмотрены первые регуляторы скорости паровых (и других) машин, широкое внедрение которых сопровождало начало промышленной революции XVIII в. Представлены регуляторы Уатта, Эри, Дженкина, Фарко (с сервомотором), электромеханический регулятор Чикалева, а также обсуждаются особенности их законов регулирования.

## ПЕРВЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ПАРОВЫХ МАШИН



**РИС. 1. ▼**  
Джеймс Уатт (1736–1819)



В предыдущей статье [1] рассматривались редкие примеры известных регуляторов с обратной связью от древних веков до XVIII в.: водяные часы, регуляторы температуры и давления, механизм разворота ветряного колеса мельниц. Однако

широкого применения подобные регуляторы не нашли из-за своей сложности и дешевизны ручного труда человека, который легко справлялся с такими задачами управления. И только с началом промышленной революции потребовались регуляторы совсем другого рода — регуляторы скорости машин.

Промышленная революция в европейских странах началась в XVIII веке с широкого применения паровых машин для откачки воды из шахт, плавки металлов, приведения в движение станков и механизмов на заводах. Особенно много машин потребовалось в XIX в. на транспорте после изобретения Робертом Фултоном (Robert Fulton) парохода в 1808 г. и Джорджем Стефенсоном (George Stephenson) паровоза в 1825 г. Французский изобретатель Клемент Адер (Clément Ader) построил в 1890 г. даже самолет с паровым двигателем.

Первым попытался использовать энергию пара для механического дви-

жения еще французский физик и изобретатель Дени Папен (Denis Papin), построивший в 1690 г. паровой цилиндр с поршнем, который был усовершенствован в 1705 г. кузнецом Томасом Ньюкаменом (Thomas Newcomen). Однако обе машины управлялись вручную, были крайне неэффективны и широкого распространения не получили. Паровую машину с автоматическим впуском и выпуском пара с помощью золотника построил английский механик, изобретатель и предприниматель Джеймс Уатт (James Watt) (рис. 1), получивший на нее первый патент в 1769 г. [2, 3].

Кроме того, паровые машины оснащались другими автоматическими устройствами: клапаном Папена, рассмотренным в предыдущей статье [1], и регулятором уровня воды в паровом котле. На рис. 2 показан поплавковый регулятор первой в России паровой машины, построенной изобретателем Иваном Ползуновым на Урале в 1765 г. [5]. Паровой котел 1,

вмурованный в кладку 2 с топкой 3, имел водяную трубу 4 и патрубок 5, отводящий пар. Уровень воды регулировался поплавком 6.

Однако паровая машина стала вполне работоспособной и популярной только после того, как Уатт ввел в нее в 1788 г. центробежный регулятор скорости, устранивший нестабильную работу машины [4]. Уже к 1800 г. в Англии работали сотни машин Уатта (рис. 3). Центробежный регулятор паровой машины был настолько важной ее составной частью, что Уатт хранил его устройство в глубоком секрете и не патентовал.

Центробежный чувствительный элемент, являющийся измерителем скорости машины, был заимствован Уаттом из водяных и ветряных мельниц, где он использовался для изменения усилия прижима жерновов при изменении скорости ветра. Его устройство было запатентовано механиком Томасом Мидом (Thomas Mead) в 1787 г. [5, 6].

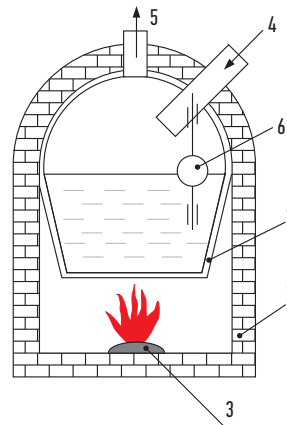
Центробежный чувствительный элемент Уатта (рис. 4), приводимый во вращение от вала машины через шкив 1, содержит два массивных шара 2, соединенных с ползуном 3, связанным рычагом 4 с заслонкой паровой машины [7]. Центробежная сила, возникающая при вращении шаров, уравновешивается их весом таким образом, что каждому значению скорости соответствует определенное положение ползуна, а следовательно, и расхода или давления пара в цилиндре. В дальнейшем для улучшения регулировки такой элемент оснащался пружиной, компенсирующей вес шаров.

При увеличении момента нагрузки скорость машины слегка падает, поскольку для увеличения давления пара заслонка должна быть приоткрыта, что достигается движением ползуна вниз, т. е. опусканием грузов. Возникающая при этом ошибка регулирования скорости была названа *неравномерностью регулятора*, а все регуляторы такого типа назывались *модераторами*, т. е. устройствами, которые не устраняют ошибку регулирования, а только ее снижают. Современное название ошибки — *статическая ошибка*, а регулятора — *статический регулятор*.

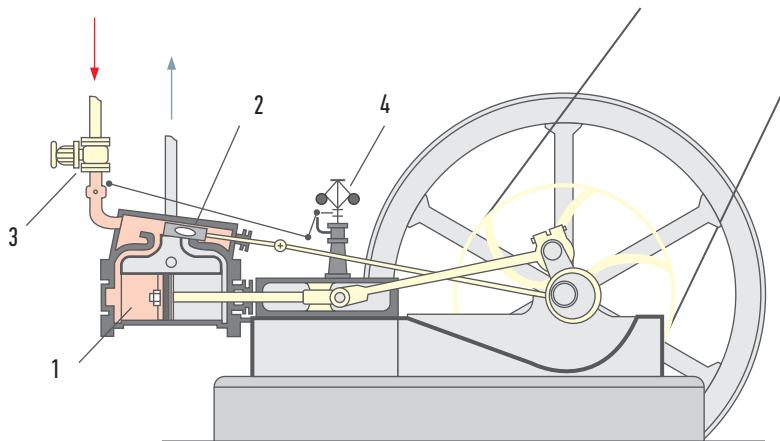
Второй особенностью регулятора Уатта является прямое механическое

действие чувствительного элемента на заслонку. Аналогично работал и рассмотренный в предыдущей статье [1] регулятор температуры Дреббеля, в котором энергия открывания вентиляции вырабатывалась спиртовым чувствительным элементом. Поэтому все регуляторы такого рода назывались *регуляторами прямого действия*.

Помимо коммерческого успеха, регулятор принес его автору и заслуженное признание. В его честь единица мощности в системе СИ названа 1 Вт. Уатт был приглашен в Российскую академию наук, правда, от этой чести отка-



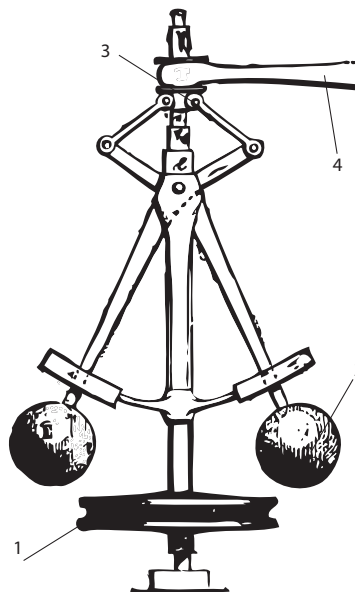
**РИС. 2.** ◀ Паровой котел Ползунова (1 — паровой котел; 2 — кладка; 3 — топка; 4 — водяная труба; 5 — патрубок, отводящий пар; 6 — поплавок)



зался. Центробежный регулятор скорости позднее нашел широкое применение также в телеграфных аппаратах, телескопах, граммофонах и т. д. [6].

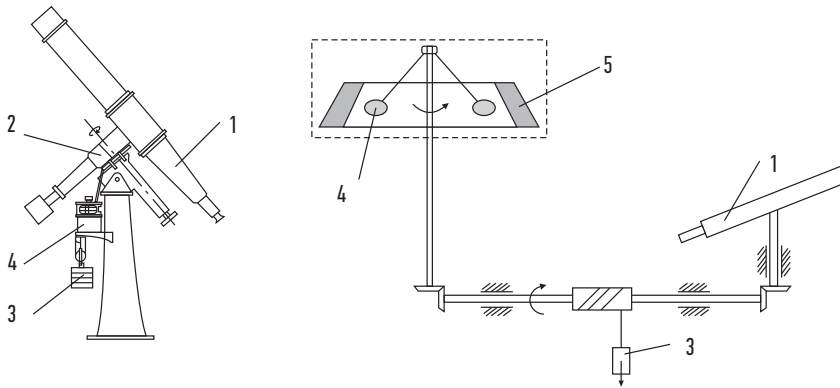
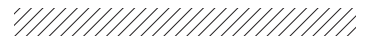
В XIX в. изобретатели предложили ряд усовершенствованных центробежных регуляторов скорости. Так, английский математик и астроном Джордж Эри (Georg V. Airy) построил в 1840 г. телескоп с автоматическим приводом по азимуту и углу места с центробежным фрикционным регулятором, обеспечивающим равномерный поворот со скоростью вращения Земли [7].

На рис. 5а показан общий вид этого телескопа, а на рис. 5б — в упрощенном виде принцип действия регулятора привода без редукторов. Труба телескопа 1 поворачивается через блок механических редукторов 2 двигателем в виде



**РИС. 3.** ▲ Паровая машина с регулятором Уатта (1 — паровой цилиндр; 2 — золотниковый распределитель; 3 — заслонка подачи пара; 4 — центробежный чувствительный элемент)

**РИС. 4.** ◀ Центробежный чувствительный элемент Уатта (1 — шкив; 2 — шары; 3 — ползун; 4 — рычаг)



**РИС. 5. ▲**

- а) Телескоп Эри;
- б) фрикционный регулятор Эри;
- 1 — труба телескопа;
- 2 — блок механических редукторов;
- 3 — двигатель в виде барабана с грузом;
- 4 — фрикционный регулятор с расходящимися шарами; 5 — муфта

барабана с грузом 3, снабженным фрикционным регулятором с расходящимися шарами 4, трущимися о поверхность неподвижной муфты 5 в случае, когда скорость вращения телескопа превышает заданную.

В данном регуляторе увеличение момента трения в опорах телескопа компенсируется уменьшением трения в регуляторе, однако это возможно лишь при некотором снижении скорости вращения,

т. е. появлении статической ошибки регулирования.

Более совершенным является регулятор паровой машины английского инженера Флиминга Дженкина (Fleeming Jenkin), построенный в середине XIX в. (рис. 6) [7].

В этом случае заслонка 1, регулирующая подачу пара в машину, поворачивается двумя устройствами: грузом 2, аналогичным двигателю Эри, и муфтой 3 фрикционного регулятора с подпружиненными шарами 4, приводимого во вращение от вала машины 5. В отличие от регулятора Эри, муфта 3 подвижна. Она прикрывает заслонку 1 тогда, когда шары вовлекают муфту во вращение.

Таким образом, когда скорость машины больше заданной, шары закрывают заслонку, а когда меньше, заслонка открывается грузом. При этом регулятор не имеет статической ошибки, поскольку, например, при увеличении нагрузки на машину и падении ее скорости груз открывает заслонку до тех пор, пока скорость машины не вернется к заданному значению.

Регулятор Дженкина снабжен, как это видно на рис. 6, еще одним весьма важным регулирующим элементом 6, называемым *катарактом*, в виде цилиндра с маслом, в котором движется груз. Катаракт был применен впервые в регуляторе Эри [7]. Было обнаружено, что введение такого элемента, который со временем стал весьма популярным, существенно улучшает плавность и точность регулирования скорости. По современной терминологии катаракт — это устройство, формирующее отрицательную обратную связь по скоро-

сти, называемую тахометрической обратной связью, являющуюся мощным средством динамической коррекции систем автоматического управления.

Другие примеры успешных регуляторов, изобретенных в XIX в., приведены в обзоре [4].

Все рассмотренные выше регуляторы являются регуляторами прямого действия, поскольку чувствительный элемент оказывает прямое силовое воздействие на заслонку или объект управления. Однако это возможно лишь в регулировании объектов малой мощности. Действительно, повернуть, например, затворы большой гидротурбины с помощью центростремительного регулятора вряд ли удастся.

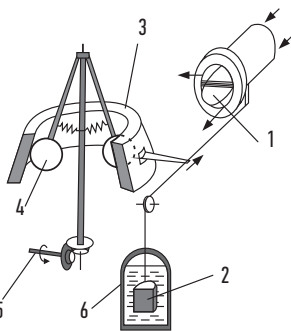
Французский инженер Жозеф Фарко (Joseph Farcot) предложил в 1873 г. ввести в регулятор дополнительный исполнительный элемент, названный им серводвигателем или сервомотором, усиливающим мощность чувствительного элемента [7, 8]. Такие регуляторы стали называть *регуляторами непрямого действия*. Пример такого регулятора приведен на рис. 7. В данном случае заслонка 1 движется дополнительным паровым цилиндром — серводвигателем 2, золотниковый распределитель 3 которого управляется центробежным регулятором 4 с пружиной.

Нетрудно убедиться в том, что введение серводвигателя не только увеличивает выходную мощность чувствительного элемента, но и обеспечивает, в принципе, нулевую ошибку регулирования скорости, на которую настроен чувствительный элемент. Действительно, заслонка не движется только тогда, когда золотник перекрывает впускные каналы цилиндра. Регулятор настраивается таким образом, чтобы этому положению золотника соответствовала заданная скорость вращения шаров.

При увеличении момента нагрузки скорость машины падает, золотник смещается вверх и сервомотор поднимает заслонку до нового положения, при котором скорость машины будет в точности равна заданной. По современной терминологии применение серводвигателя в регуляторе непрямого действия означает введение интегратора, превращающего статическую систему в астатическую.

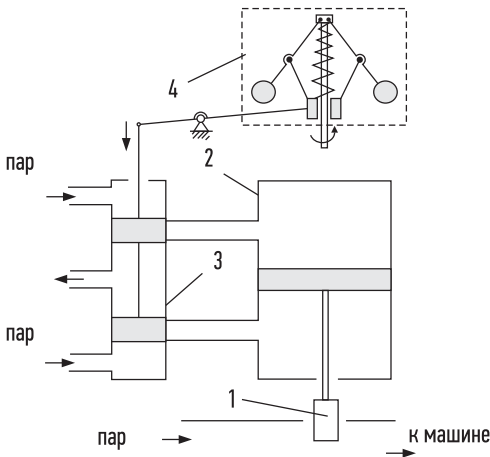
**РИС. 6. ►**

- Регулятор Дженкина
- (1 — заслонка;
- 2 — груз; 3 — муфта;
- 4 — подпружиненные шары; 5 — вал;
- 6 — катаракт)



**РИС. 7. ▼**

- Регулятор непрямого действия (1 — заслонка;
- 2 — серводвигатель;
- 3 — золотниковый распределитель;
- 4 — центробежный регулятор с пружиной)



Все рассмотренные регуляторы с обратной связью используют принцип регулирования по отклонению или по ошибке. Современная терминология относит их к *П*- или *ПИ*-регуляторам. Однако в XIX в. появились и другие устройства: с регулированием по возмущению и с регулированием по производной от ошибки. Регулирование по возмущению или по нагрузке (принцип инвариантности Понселе) было предложено в 1830 г. французским математиком и инженером Жаном-Виктором Понселе (Jean-Victor Poncelet), а регулирование по производной выполнял так называемый инерционный регулятор, изобретенный в 1845 г. братьями Вернером и Вильгельмом Сименсами (Verner, Wilhelm Siemens) в Германии [4, 7].

Принципы построения и конструкции различных регуляторов детально анализировались в лекциях 1846 г. знаменитого профессора Петербургских железнодорожного и технологического институтов Николая Федоровича Ястржембского [8].

К концу XIX в. стали появляться и первые электромеханические регуляторы. Примером может служить дифференциальный регулятор дуговых ламп для освещения московских площадей, построенный известным российским электротехником Владимиром Николаевичем Чиколевым в 1874 г. Схема регулятора, заимствованная из [9], показана на рис. 8, где штриховыми линиями обозначены соединительные провода.

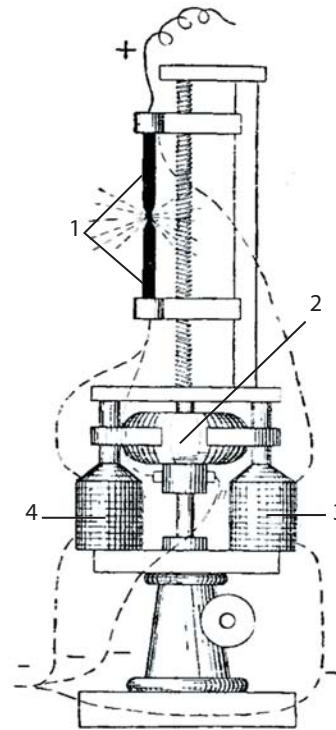
Электроды 1 дуговой лампы сближаются через винтовую передачу электродвигателем постоянного тока с обмоткой якоря 2 и двумя обмотками возбуждения 3 и 4, причем обмотка 3 подключается прямо к источнику питания, а обмотки 2 и 4 соединяются с нижним электродом. Обмотки 3 и 4 создают потоки возбуждения двигателя противоположных знаков, причем их действие уравнивается при нормальном зазоре между электродами. При увеличении зазора его сопротивление растет, а ток падает, что приводит к преобладающему действию обмотки 4 и вращению двигателя в сторону сближения электродов. При чрезмерном сближении электродов будет преобладать действие обмотки 3, обеспечивающей вращение двигателя в противоположную сторону и увеличение зазора.

\* \* \*

Таким образом, новый этап развития систем автоматизации, начавшийся с изобретения и внедрения паровой машины, отличался следующими основными особенностями:

- Паровая машина потребовала ряда автоматических устройств, таких как клапан давления, регулятор уровня, золотниковый парораспределитель и регулятор скорости вращения, что поставило перед изобретателями первые серьезные задачи *автоматического* управления.
- Наибольшее распространение получили центробежные регуляторы скорости *прямого действия*, в которых чувствительный элемент обладал непосредственным воздействием на заслонку (регулятор Уатта) либо создавал переменный нагрузочный момент трения (регулятор Эри).
- Эти регуляторы имели *пропорциональный (П)* закон регулирования, вызывающий статическую ошибку, устранимую в регуляторе Дженкина механическим интегратором, обеспечивающим *пропорционально-интегральный (ПИ)* закон регулирования.
- До середины XIX в. были предложены и другие законы регулирования: по возмущению (принцип Понселе) и по производной от ошибки (регулятор Сименсов).
- В регуляторах *непрямого действия*, первый из которых был создан Фарко, чувствительный элемент управлял дополнительным сервомотором заслонки, что не только повышало мощность регулятора, но и обеспечивало астатизм регулирования скорости.
- Появились регуляторы и других машин, например фрикционный регулятор вращения телескопа Эри, электромеханический регулятор дуговой лампы Чиколева и др.

Ко второй половине XIX в. было известно уже большое число различных достаточно сложных конструкций регуляторов, заложивших основы создания замкнутых систем автоматического управления в современном понимании этого термина. Однако отсутствовали не только методики расчета, выбора параметров и настройки, но и теоретическое понимание происходящих в них процессов регулирования.



**РИС. 8.** ◀  
Регулятор Чиколева  
(1 — электроды;  
2 — обмотка якоря;  
3 и 4 — обмотки  
возбуждения)

Как будет показано в следующей статье, широкое внедрение паровых и других машин, а также повышение точности и быстродействия их регулирования выявило проблему устойчивости регулятора, вызванную противоречием между требованиями точности и устойчивости работы машины, а также наличием в ней нелинейных элементов. ●

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мижеров А. Г. Автоматические устройства от Древнего мира до начала промышленной революции // Control Engineering Россия. 2014, № 3 (51).
2. Lewis F.L. History of feedback control. [http://userspages.uob.edu/bh/ebrgallaf/history\\_of\\_feedback\\_control.pdf](http://userspages.uob.edu/bh/ebrgallaf/history_of_feedback_control.pdf)
3. Introduction to control Systems (from R. H. Bishop, R. C. Dorf. Modern Control Systems. Prentice Hall, 2010). <http://esminfo.prenhall.com/engineering/dorf/closerlook/pdf/DDR-01-001-036-hrpdf>
4. Bennet Stuart. A brief history of automatic control. <http://userspages.uob.edu/bh/ebrgallaf/00506394.pdf>
5. Bissell C.C. History of Automatic Control. [http://siamun.weebly.com/uploads/4/1/7/3/4/173241/history\\_of\\_automatic\\_control.pdf](http://siamun.weebly.com/uploads/4/1/7/3/4/173241/history_of_automatic_control.pdf)
6. Dennis S. Bernstein. Feedback Control: an invisible thread in the History of Technology. IEEE // Control Systems Magazine. April 2002.
7. Максвелл Д. К., Вышнеградский И. А., Стодоло А. Теория автоматического регулирования (линеаризованные задачи). М.: Изд-во АН СССР. 1949.
8. Храмов А. В. Очерк развития автоматического регулирования в СССР // Основы автоматического регулирования. М.: Матгиз. 1954.
9. Шателен М. А. Русские электротехники второй половины XIX века. Л.—М.: Госэнергоиздат. 1949.