

Щипанов Г.В.

**Основы теории
автоматического
пилотирования и автопилоты**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 656
ББК 39.1
Щ84

Щ84 **Щипанов Г.В.**
Основы теории автоматического пилотирования и автопилоты / Щипанов Г.
В. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 126 с.

ISBN 978-5-458-38614-2

ISBN 978-5-458-38614-2

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ВВЕДЕНИЕ

Автоматическое регулирование в более или менее общем виде можно определить, как поддержание заданного, заранее выбранного значения или закона изменения физической величины или же характеристики состояния и поведения какого-либо процесса, например, положения, скорости, давления, температуры, течения жидкости и т. д. К автоматическому регулированию в настоящее время проявляется громадный интерес. В одних случаях оно используется как средство сбережения человеческих усилий, например, в применении к самолету при перелетах на дальние дистанции; в других — оно необходимо для получения такого высокого качества работы агрегата, установки, машины и т. д., которое недостижимо при помощи ручного управления (паровые котлы). Наконец, к автоматическому регулированию иногда прибегают потому, что обстоятельства не позволяют воспользоваться каким-либо из видов неавтоматического контроля (управление торпедами).

Круг вопросов, охватываемый предметом, очень широк, но в теории и на практике его можно резко и естественно разделить на две области по признаку наличия или отсутствия количества движения или его эквивалента среди факторов, влияющих на регулируемую величину или характеристику. Автоматическое управление рулем корабля, цель которого заключается в том, чтобы заставить корабль следовать предписанному курсу, относится к первой области вопросов, так как в этом случае количество движения, с которым корабль отклоняется от своего курса или возвращается к нему, играет важную роль в действии системы контроля. Автоматическое регулирование температуры относится ко второй области, так как, вообще говоря, повышение или понижение температуры тела не сопровождается никаким эффектом, связанным с наличием количества движения.

Вообще говоря, обе области вопросов нуждаются в самостоятельном рассмотрении, так как устройства для автоматического управления при наличии количества движения — будем их называть устройствами первого рода, — настолько сходны по выполняемым функциям, что их полезно изучать в свете некоторых общих принципов, образующих общую теорию автоматического регулирования. Эти же принципы относятся и к устройствам для регулирования в случае отсутствия количества движения; будем их называть устройствами второго рода. Поэтому введение в сферу общей теории устройств второго рода, в значительной мере индивидуальных в отношении способа действия и деталей конструкции, мало или почти ничего не прибавляет к тому, что дает рассмотрение устройств первого рода. В большинстве случаев устройства второго рода проще рассматривать как отдельные приборы, каждый из которых действует способом, характерным для него и для частной задачи, им выполняемой. Некоторые механические элементы конструкции, например

родов. Однако наличие фактора, связанного с количеством движения, в устройствах первого рода и отсутствие его в устройствах второго рода создает между ними, можно считать, существенное различие.

В настоящем сборнике статей мы ограничимся изложением общей теории регулирования и описанием типичных систем регулирования первого рода. Устройствами такого рода, осуществленными на практике, являются многочисленные приборы для управления направлением движения или положением массивных тел, например, морских судов, торпед и самолетов.

Автоматическое управление рулями кораблей системы Сперри (Sperry), Брауна (Brown), Минорского (Minorsky), Гендерсона (Henderson) может служить примером автоматического регулирования движения тела вокруг одной оси. Контроль курса и глубины погружения торпед представляет собой пример регулирования, по крайней мере, относительно двух осей. Существующие системы автопилотов — Сименса (Siemens), Сперри, Смита (Smith) (British RAE) и Поллок Брауна (Pollock Brown) являются системами регулирования относительно одной, двух или всех трех осей одновременно и могут, как в случае системы Сименса, сопровождаться дополнительным автоматическим регулированием высоты.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Если принять некоторые упрощающие предположения, то для построения общей теории автоматического регулирования нужен весьма несложный математический аппарат¹. Однако благодаря этим упрощениям вопрос об автоматическом регулировании в дальнейшем изложении освещается только с качественной стороны.

Рассмотрение общей теории автоматического регулирования систем, обладающих количеством движения, начнем с простейшего возможного примера.

Предположим, что тело с массой m (фиг. 1), сконцентрированной в точке, может свободно принимать любое положение на линии XX' и что оно подвержено действию преходящих случайных сил, которые могут сдвигать его вниз или вверх по прямой. Допустим далее, что тело нужно подвергнуть автоматическому регулированию, предназначенному для возвращения тела m после каждого случайного отклонения в некоторое определенное, заранее выбранное положение O .

Первое очевидное требование в решении задачи заключается в том, что к телу нужно приложить восстанавливающую силу, которая должна равняться нулю до тех пор, пока тело остается в положении O , и которая должна действовать от X к O при движении тела вверх и от X' к O — при движении вниз. Эта сила может быть постоянной, независимо от величины отклонения; она должна лишь изменять направление в зависимости от направления отклонения. Однако, как подсказывает интуиция, лучше, если сила будет возрастать с возрастанием величины отклонения. Если сила постепенно возрастает, то тело при прохождении пункта O в одном направлении будет испытывать вместо внезапно изменяющей направление восстанавливающей силы силу, которая изменяется до нуля и затем опять возрастает в противоположном направлении.



Фиг. 1.

¹ В основном эти упрощения, как будет видно из дальнейшего, сводятся к игнорированию кулоновского трения в элементах регулятора, к пренебрежению инерцией его движущихся масс, к предположению о линейности уравнений, характеризующих поведение регулируемого объекта и регулятора. *Прим. ред.*

Можно сделать так, чтобы величина восстанавливающей силы изменялась пропорционально первой, второй или иной степени отклонения $От$ или по какому-либо другому закону, который будет делать ее равной нулю в момент нахождения тела в положении O . Два соображения помогают сделать здесь выбор. Во-первых, практически применяемые приспособления для создания восстанавливающих сил, приложенных к телу. Например, пружины обычно обладают такими свойствами, что восстанавливающая сила оказывается пропорциональной или приблизительно пропорциональной первой степени отклонения. Во-вторых, при математическом анализе поведения тела, подвергающегося автоматическому регулированию, для избежания почти непреодолимых сложностей приходится предполагать, что восстанавливающая сила пропорциональна первой степени отклонения, несмотря на то, что математически точная линейная зависимость между восстанавливающей силой и отклонением практически не всегда имеет место. В этом заключается одна из возможных причин расхождения результатов анализа и опыта ¹.

Почти самоочевидно, что положение тела не будет регулироваться приемлемым образом, если восстанавливающая сила сводится только к силе, пропорциональной перемещению. Примем, что некоторая преходящая случайная сила отклонила тело в положение A . Тогда в начальный момент восстанавливающая сила будет пропорциональна расстоянию OA . При возвращении тела в положение O эта сила будет уменьшаться до нуля. Несмотря на то, что сила станет в точке O равной нулю, эффект ее действия между точками A и O будет сохраняться, вследствие чего тело придет в пункт O с некоторой скоростью. Количество движения, соответствующее этой скорости, заставит тело пройти через положение O и даст ему возможность двигаться вниз, навстречу изменившей знак и возрастающей восстанавливающей силе. Движение будет происходить до тех пор, пока тело не достигнет точки A' , отстоящей от точки O (вниз) на таком же расстоянии, как точка A от точки O (вверх). В точке A количество движения станет равным нулю, и тело, находившееся в течение одного мгновения в покое, начнет двигаться вверх по направлению к точке O под действием ничем не компенсируемой восстанавливающей силы. Приобретая вновь количество движения, тело пройдет через точку O и опять поднимется в точку A . Затем цикл повторится снова.

Отсюда следует, что восстанавливающая сила, пропорциональная смещению, являясь средством возвращения тела в положение O , а превращения случайного отклонения в непрерывное колебание тела около точки O . Это колебание происходит вследствие того, что тело запасает количество движения. Если бы тело не обладало массой, то оно не обладало бы способностью запасать количество движения, и колебания не возникали бы. Именно по этой причине наличие или

¹ В действительности предположение о линейной зависимости между восстанавливающей силой и отклонением при рассмотрении вопроса об автоматическом регулировании во всей полноте и строгости вполне допустимо и не может заметно повлиять на совпадение результатов анализа и опыта. *Прим. ред.*

отсутствие количества движения у регулируемого объекта является признаком, по которому теория регулирования как предмет исследования делится нами на две части.

Чтобы устранить колебания, очевидно нужно найти средства для прогрессивного уменьшения количества движения, которым тело обладает при прохождении через точку O . Не учитывая практической оговорки, которая будет сделана ниже, можно утверждать, что совершенно предотвратить колебания нельзя. Можно только заставить их затухнуть в короткий период времени, а не продолжаться бесконечно долго.

Предположим, что средства для уменьшения количества движения найдены. Если эти средства будут введены в действие немедленно, после того как тело покинет точку A при первом колебании, то количество движения, которым тело будет обладать в положении O , окажется недостаточным для передвижения его в точку A' . Если первоначальное смещение OA по величине равно l , то второе смещение по направлению к A' будет меньше l , скажем, pl , где p — правильная дробь. Продолжая уменьшать количество движения, можно достигнуть того, что тело при последующем движении вверх к точке A остановится на мгновение на расстоянии, не только меньшем l , но и pl , скажем, на расстоянии qpl , где q — другая правильная дробь. При следующем колебании по направлению к A' максимальное смещение будет равно $gqpl$ и т. д. Таким образом после каждого размаха амплитуда колебаний относительно O будет уменьшаться до тех пор, пока тело не остановится в точке O .

Произведение $pqr\dots$ ряда дробей никогда не может равняться нулю. Поэтому теоретически колебание никогда не затухнет. На практике, однако, можно добиться, что после нескольких колебаний амплитуда остаточного колебания не будет отличаться от нуля.

Очевидно в течение начального колебания от A к O для уменьшения количества движения, с которым тело проходит через точку O , к телу необходимо приложить некоторую силу, действующую в направлении, противоположном направлению скорости, т. е. силу, действующую вверх. Восстанавливающая сила при движении от A к O действует вниз. Таким образом добавочная сила должна противодействовать восстанавливающей силе. Эта сила может быть получена при помощи специального приспособления, совершенно отличного от приспособления, создающего восстанавливающую силу. Однако, поскольку речь идет о движении тела, добавочная сила может быть получена и путем уменьшения восстанавливающей силы до значения, меньшего, чем требует закон прямой пропорциональности. Математически между действием двух отдельных сил и действием одной силы, равной их результирующей, разницы нет. Однако, как мы увидим, практическое осуществление действия двух отдельных сил может значительно отличаться от практического осуществления действия их результирующей.

Рассмотрим последующую часть движения от точки O вниз к некоторой точке вблизи точки A' . Количество движения в положении O уменьшилось. Остающаяся часть затрачивается против пере-

менившей знак и возрастающей по мере удаления от точки O вниз восстанавливающей силы. Уменьшение количества движения в положении O может вызвать остановку тела в некоторой точке вблизи точки A' . Однако ясно, что процесс затухания величины отклонения (амплитуды) можно ускорить, продолжая прилагать добавочную, направленную вверх силу в течение того времени, когда тело движется к точке A' . Эта добавочная сила будет теперь помогать восстанавливающей силе, и обе силы, действуя вместе, будут уменьшать количество движения тела быстрее, чем одна восстанавливающая. Как уже отмечалось, восстанавливающая и добавочная силы могут быть получены при помощи двух различных приспособлений — силовых источников. Однако, поскольку речь идет о движении тела, эффект, эквивалентный действию обеих сил, может быть получен в рассматриваемой части движения путем увеличения восстанавливающей силы выше значения, предписываемого законом прямой пропорциональности.

В течение следующей части движения, а именно — при движении тела от некоторой точки, близкой к A' , обратно к O , начнем опять уменьшать количество движения, приложив к телу силу, действующую вниз и, таким образом, направленную, противоположно приобретаемой теперь телом скорости движения, вверх. Эта сила будет теперь противодействовать восстанавливающей силе, и обе силы, действуя вместе, приведут тело к состоянию покоя быстрее, чем одна восстанавливающая.

Восстанавливающая сила, пропорциональная смещениям тела, может быть получена с помощью пружин или других приспособлений, дающих силу, пропорциональную отклонению тела. Добавочная сила должна попеременно то помогать, то противодействовать восстанавливающей силе. Как осуществить эту переменную силу на практике?

Из данной выше схемы затухания амплитуд колебаний следует, что добавочная сила должна быть направлена вверх в течение всего времени, пока тело движется вниз от A к A' , и вниз, пока тело движется вверх к точке A от точки, близкой к A' . Если связать направление добавочной силы с направлением, в котором происходит движение тела, то эта сила будет менять знак в нужные моменты времени.

Необходимо еще установить величину добавочной силы. Так же, как и в случае восстанавливающей силы, можно сделать ее постоянной по величине и просто менять знак в крайних точках отклонения тела. Однако, как и прежде, для плавности действия требуется постепенно возрастающая сила. При приближении тела к одной из крайних точек отклонения она должна уменьшаться, стремясь к нулю, а затем при перемене направления движения — вновь возрастать от нуля в обратном направлении. Скорость тела изменяется именно таким образом.

Поэтому естественно связать величину добавочной силы, прикладываемой к телу в любой момент, со скоростью тела в этот момент, предусмотрев, чтобы направление добавочной силы во все моменты времени было противоположным направлению скорости.

Опять, как и в случае восстанавливающей силы, можно принять для добавочной силы любой закон изменения. Можно сделать добавочную силу пропорциональной первой, второй или иной степени скорости или сделать ее зависящей от скорости в соответствии с любым другим законом, при котором добавочная сила будет обращаться в нуль одновременно со скоростью. Соображения, которыми мы руководствовались при выборе закона для восстанавливающей силы, теперь, к сожалению, оказываются противоречивыми. Очень удобно для получения добавочной силы применить демпфер, использующий жидкое трение. Сопротивление в поршне демпфера всегда противодействует движению его (поршня), а следовательно, и движению тела, к которому прикреплен поршень. Это сопротивление равно нулю, если скорость поршня также равна нулю. При скорости, отличающейся от нуля, сопротивление, по крайней мере приближенно, пропорционально квадрату скорости, за исключением моментов, когда скорость очень мала. Поэтому демпфер, или другое подобное приспособление, очень удобен при подходящих обстоятельствах для получения добавочной силы, создающей затухание колебаний. К сожалению, изучение движения тела при помощи простого математического анализа возможно только в том случае, когда добавочная сила пропорциональна первой степени скорости. В связи с этим нужно или искать какое-нибудь иное приспособление, создающее силу, строго пропорциональную первой степени скорости, или удовлетвориться неполным, приближенным анализом движения. На практике, обычно, довольствуются последним, так как этот выход достаточно удовлетворителен, хотя таким путем и создается вторая причина, которая иногда может привести к расхождению между действительными и предполагаемыми результатами.

Так как принятый ход рассуждений основан на упрощенном математическом анализе задачи, то мы вынуждены принять, что: 1) восстанавливающая сила строго пропорциональна первой степени перемещения и 2) добавочная сила строго пропорциональна первой степени скорости. Под перемещением и скоростью подразумеваются перемещение и скорость, существующие в любой момент. Если бы действовала только восстанавливающая сила, то перемещение и скорость в любой момент имели бы некоторые определенные значения. При введении в действие добавочной силы эти значения изменяются. Восстанавливающая и добавочная силы должны быть пропорциональны именно этим последним измененным значениям. В частности, добавочная сила должна быть пропорциональна не скорости, которую имело бы тело при действии только восстанавливающей силы, но непосредственно определяемой, в действительности существующей скорости, т. е. скорости, которую эта добавочная сила совместно с восстанавливающей придает телу.

Точно так же под перемещением в любой момент нужно понимать то, которое создается совместно восстанавливающей и добавочной силами, и восстанавливающая сила должна быть пропорциональна действительно существующему перемещению.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ЗАМЕЧАНИЕ

Неспособность математики трактовать простым способом движение колеблющегося тела, подверженного действию демпфирующей силы, непропорциональной первой степени скорости, имеет глубокие основания. В то время как дифференциальное уравнение

$$\ddot{x} + A\dot{x} + Bx = 0 \quad (1)$$

можно полностью решить элементарными методами, для решения уравнения

$$\ddot{x} + A_1(\dot{x})^2 + Bx = 0 \quad (2)$$

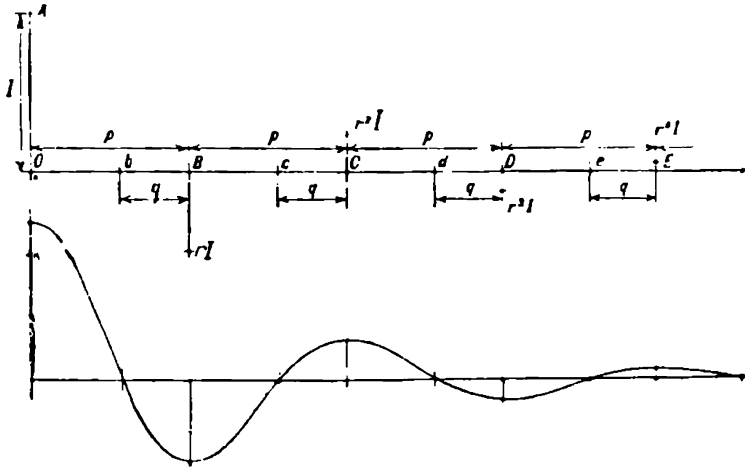
надо прибегать к сложным приближенным методам.

Почему второе уравнение нельзя решить обычными методами, — достаточно хорошо неизвестно. Объяснение, может быть, лежит в том, что это уравнение представляет колебания, происходящие, так сказать, при неестественных условиях. В первом уравнении второй член изменяет знак при изменении знака x ; это соответствует тому, что сопротивление демпфирующей силы всегда противоположно направлению скорости. Соответствующий член второго уравнения между тем всегда положителен и поэтому указывает на то, что сопротивление противодействует скорости при движении тела в одном направлении и помогает ей при движении тела в противоположном направлении. Чтобы учесть, что сопротивление всегда противоположно скорости, мы принуждены рассматривать движение по частям, меняя знак второго члена при каждой перемене направления движения. Этот процесс и применяется в приближенном методе решения уравнения (2).

СТАТЬЯ II

ГЕОМЕТРИЯ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Примем в соответствии с принципами, рассмотренными в первой статье, что на тело m (см. фиг. 1) одновременно действуют: 1) сила, пропорциональная в любой момент смещению тела из точки O , и 2) сила, пропорциональная в любой момент первой степени скорости тела и



Фиг. 2.

всегда направленная против скорости тела. Эти данные вместе с заданием массы тела достаточны для составления двух уравнений: 1) определяющего отклонение тела и 2) определяющего скорость тела в любой момент, после того как оно было отклонено от положения покоя O в любую точку A и затем предоставлено самому себе. Эти уравнения известны. Попытаемся пояснить основные, получаемые из них выводы графически.

Рассматривая перемещение тела, предположим, что оно несет на себе карандаш, который нажимает, не производя трения, на полосу бумаги, движущуюся с постоянной скоростью справа налево под линией XX' . Кривая, воспроизведенная карандашом, будет изображать смещение тела в любой момент. Кривая начнется, естественно, в некоторой точке A (фиг. 2), расстояние l которой до точки O равно на-

чальному смещению тела. Чтобы представить себе характер кривой смещения, нанесем вдоль базисной линии ряд точек $B, C, D...$ на некотором одинаковом расстоянии p друг от друга. Нанесем затем второй ряд точек $b, c, d...$ так, чтобы каждая из них лежала на некотором одинаковом расстоянии q слева от соответствующей точки первого ряда. Расстояние q должно быть взято меньшим, чем $\frac{1}{2}p$. Желая представить колебание, которое затухает медленно, выбираем для q значение, мало отличающееся от $\frac{1}{2}p$. Если колебание должно затухнуть быстро, то для q нужно выбрать значение, близкое, но не равное нулю. Точки $b, c, d...$ второго ряда соответствуют моментам времени, в которые тело проходит через свое начальное положение O . Поэтому в данных точках кривая отклонений будет пересекать базисную линию. Точки $B, C, D...$ первого ряда соответствуют моментам времени, в которые тело достигает крайнего положения во время совершаемых им колебаний. В этих точках кривая отклонения имеет или максимумы, или минимумы. Кривая, начинающаяся в точке A , идет вниз через точку b к некоторому минимальному значению в точке B , а затем вверх через точку c к некоторому максимальному значению, в точке C и т. д. Чтобы найти последующие максимумы и минимумы, выберем дробь r , которая меньше единицы. Если колебания должны затухать медленно, то r должно быть близким к единице, если же колебания должны затухать быстро, то r должно иметь малое, приближающееся, но не равное нулю, значение. Пусть начальное отклонение OA равно I . Тогда минимум в точке B будет равен rI , максимум в точке C — r^2I , минимум в точке D — r^3I и т. д. Другими словами, величина любого максимума или минимума равна значению непосредственно предшествующего максимума или минимума, умноженному на r . Отложив в точках $B, C, D...$ в требуемых направлениях ординаты, имеющие длину, определяемую указанным образом, можно построить кривую отклонений (фиг. 2, внизу).

Необходимо заметить, что r и q должны выбираться таким способом, который учитывает наличие некоторого связывающего их соотношения. Это соотношение является вполне определенным, т. е., выбрав некоторое значение q или точнее q/p , мы обязаны выбрать совершенно определенное значение r . Так как множитель r представляет собой непосредственную меру затухания колебаний, то, очевидно, более удобно выбрать сначала значение r , а затем на основании табл. 1

Таблица 1

| Значения q/p | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-----------|---|
| r | 1 | $7/8$ | $3/4$ | $5/8$ | $1/2$ | $3/8$ | $1/4$ | $1/8$ | $1/100$ | $1/10000$ | 0 |
| q/p | 0.5 | 0.486 | 0.471 | 0.453 | 0.431 | 0.403 | 0.367 | 0.314 | 0.191 | 0.165 | 0 |

соответствующее значение отношения q/p . Заметим, что в первой графе таблицы даны $r = 1$ и $q/p = 0.5$. Если $r = 1$, то все колебания имеют одинаковые амплитуды и не затухают. При этом $q = \frac{1}{2} p$, и кривая