

Раздел 1 Основы автоматизации производства

Тема 1.4 Законы регулирования

Содержание темы: История развития законов регулирования Регулятор уровня воды в котле Ползунова. Регулятор скорости маховика Уатт. Принципы регулирования. Устойчивость систем автоматического регулирования. Характеристики звеньев в САР. Позиционные законы (двух и трех позиционные). Пропорциональный закон регулирования. Интегральный закон регулирования. Настройки, динамические характеристики Пропорционально-интегральный (ПИ). Пропорционально-дифференциальный (ПД). Пропорционально-интегральнодифференциальный (ПИД). Настройки динамические характеристик.

1. История развития законов регулирования

Включает следующие этапы:

1765 год — изобретение русским механиком И. И. Ползуновым автоматического регулятора питания парового котла.

В 1873 французский инженер Ж. Фарко впервые осуществил не прямое автоматическое регулирование, введя в цепь регулирования усилитель — гидравлический сервомотор с жёсткой обратной связью. Это дало возможность не только повысить мощность воздействия регулятора, но и получить более гибкие алгоритмы регулирования. В 1884 появился регулятор непрямого действия с дополнительной релейной обратной связью, действовавшей до тех пор, пока отклонение было отлично от нуля. Затем релейная связь была заменена непрерывной дифференциальной связью, получившей название изодромной.

1784 год — изобретение английским изобретателем Дж. Уаттом центробежного регулятора скорости паровой машины.

1804–1808 гг. - система программного управления ткацким станком Ж-М. Жаккара.

В это время начали формироваться важнейшие принципы автоматики: принцип регулирования по отклонению Ползунова-Уатта, развившийся в концепцию обратных связей, и принцип регулирования по нагрузке, послуживший основой теории инвариантности.



Рис.1. Иван Иванович Ползунов

В 1868 году Д. К. Максвелл выполнил первый строгий математический анализ устойчивости системы управления с обратной связью. Он исследовал влияние параметров системы на устойчивость и показал, что система устойчива, если корни характеристического уравнения имеют отрицательные действительные значения. Основы науки об автоматическом управлении впервые изложены в статье английского физика Дж. К. Максвелла «О регулировании».

В 1877 году профессор Петербургского практического института Иван Алексеевич Вышнеградский исследовал устойчивость регуляторов и рассмотрел динамику системы регулятор-машина и изучил влияние регулятора на процессы в системе (1876 г.).

Практическим результатом работ И. А. Вышнеградского и Дж. К. Максвелла стала возможность рассчитать регулятор в каждом конкретном случае. В этих работах можно найти истоки современных инженерных методов исследования устойчивости и качества регулирования.

В 1893 году А. Б. Стодола впервые вводит понятие постоянной времени системы и предлагает оценивать устойчивость системы по устойчивости характеристического уравнения.

В 1892 году А.М. Ляпунов опубликовал в России своё знаменитое сочинение «Общая задача об устойчивости движения». В этой работе учёный дал первое в истории науки математически строгое определение устойчивости движения, а также разработал два метода решения задач об устойчивости.

В 1909 году в России издается первый русский учебник по теории регулирования Н. Е. Жуковского «Теория регулирования хода машин».

В 1920-е годы переход к использованию индивидуальных электроприводов значительно улучшил технологические процессы и экономическую эффективность механической обработки. Это способствовало не только энергетической механизации станков, но и усовершенствованию их управления.

Широкое применение автоматизированного электропривода в 30-е годы XX века положило начало современной автоматизации производства. Тогда же возник и сам термин «Автоматизация производства».

В 1932 году американский учёный Х. Найквист предложил для оценки устойчивости систем частотный критерий устойчивости.

В 1934 году И. Н. Вознесенский впервые выдвинул принцип автономного регулирования. Большой его заслугой является разработка общего метода разбиения процесса регулирования с несколькими регулируемыми величинами на ряд автономных процессов.

В 1938 году А. В. Михайлов опубликовал работу «Гармонический метод в теории регулирования», которая вошла в практику в послевоенные годы.

1946 год — Г. Боде и Л. Маккол ввели логарифмические частотные характеристики.

1950-е годы — автоматизация активно внедрялась по всему спектру ведущих отраслей советской экономики. В машиностроении запускались автоматические производственные линии, а электростанции переходили на автоматизированное управление. Металлургическая промышленность достигла высокого уровня автоматизации процессов выплавки, а нефтеперерабатывающая и химическая отрасли внедрили автоматические установки. Во взрывоопасных химических производствах получило широкое распространение телемеханическое управление процессами.

В начале 60-х годов XX века начались работы по созданию автоматизированных систем управления (АСУ) на предприятиях химической и смежных отраслей промышленности. К концу 70-х годов XX века достигнуты значительные успехи, при этом осознана необходимость разумного объединения АСУ технологическими процессами (АСУ ТП) и АСУ предприятиями (АСУП), и стали разрабатываться интегрированные АСУ (ИАСУ) производствами и предприятиями химической и смежных отраслей промышленности.

В начале 70-х годов на базе ЭВМ начали выпускаться первые «централизованные системы управления» технологическим процессом.

Новый этап в развитии автоматического регулирования наступил с применением в регуляторах электронных элементов, в частности вычислительных устройств, что существенно расширило возможность усовершенствования алгоритмов регулирования введением воздействий по высшим производным, интегралам и более сложным функциям. Преимущества электронных регуляторов особенно проявились в самонастраивающихся системах, первыми из которых были экстремальные регуляторы: регулятор топки парового котла (1926), электрический регулятор КПД (1940), авиационные регуляторы (1944).

Однако подобные регуляторы применяют лишь в простейших случаях, например для поддержания экстремума функции одной переменной. В более сложных САР целесообразно разделить систему регулирования на две части: вычислительное устройство, определяющее оптимальную настройку регулятора, и собственно регулятор. В сложных системах управления автоматическое регулирование используется лишь на низшей ступени иерархического управления — регуляторы воздействуют непосредственно на управляемый объект, являясь исполнителями команд ЭВМ (или операторов), находящихся на более высоких ступенях управления.

2. Регулятор уровня воды в котле Ползунова.

Регулятор уровня воды в котле системы Ползунова представляет собой поплавок, жёстко соединённый с муфтами, перемещающимися вдоль питательной трубы, и с клапаном.

Принцип работы: при изменении уровня жидкости в котле в связи с изменившейся потребностью расхода пара поплавок, перемещаясь, переставляет клапан, вследствие чего изменяется количество воды, подаваемой в котёл.

Если уровень воды поднимался выше положенного, то поплавок, перемещаясь вверх, закрывал клапан и подача воды прекращалась.

Этот регулятор был разработан и внедрён русским теплотехником И.И. Ползуновым ещё в XVIII веке (1765 г.).

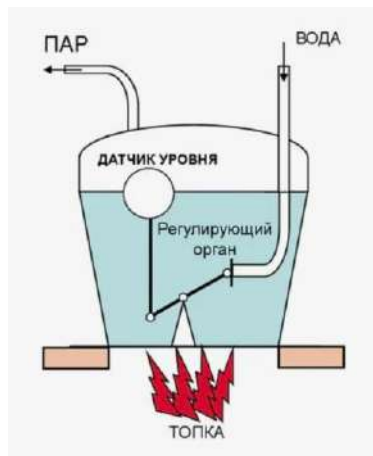


Рис. 2. Регулятор Ползунова

3. Регулятор скорости маховика Уатт.

Регулятор скорости маховика Уатта — это центробежный регулятор, изобретённый английским механиком Джеймсом Уаттом в 1784 году. Он предназначен для обеспечения постоянной угловой скорости вращения вала машины (классической паровой машины, паровой или гидравлической турбины, дизельной установки и т.д.).

Принцип действия регулятора заключается в следующем:

1. При вращении вала двигателя грузы регулятора отклоняются в стороны и тягами перемещают муфту.
2. Муфта, в свою очередь, поднимает и опускает рычаг заслонки.
3. Если вал вращается быстро, то тяжёлые шары под действием сил инерции расходятся в стороны, и присоединённые к ним тяги поднимают муфту. Тогда рычаг заслонки поворачивается и закрывает трубу, прекращая подачу пара на поршень двигателя.
4. Если скорость вращения вала уменьшается, то шары под действием силы тяжести снижаются, опуская муфту. Муфта с помощью рычага приоткрывает заслонку и увеличивает подачу пара на двигатель.

Таким образом осуществляется отрицательная обратная связь, позволяющая автоматически регулировать скорость вращения вала двигателя.

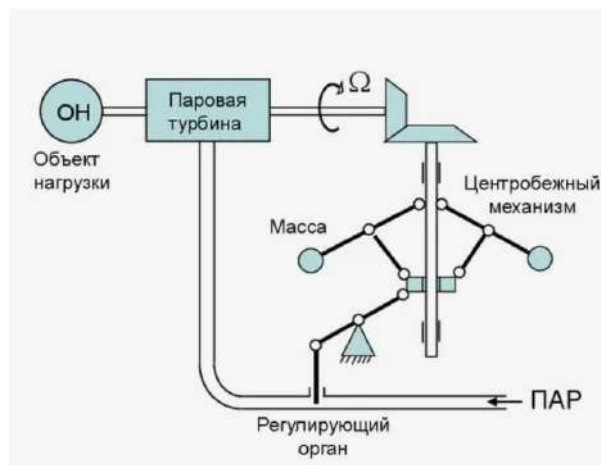


Рис. 3. Регулятор скорости Уатт.

4. Принципы регулирования.

Принципы регулирования в автоматизации производства:

1. **Принцип по возмущению.** Регулятор осуществляет регулирующие воздействия по величине возникшего возмущения. Преимущество этого метода в том, что воздействие возмущения на регулируемую величину может быть устранено до того, как произошло отклонение регулируемой величины.

2. **Принцип по отклонению.** Регулятор измеряет отклонение регулируемой величины от заданной величины и, перемещая регулирующий орган, воздействует на объект регулирования таким образом, чтобы свести отклонение (ошибку) к минимуму. Регулятор приходит в действие только при возникновении отклонения независимо от причины его вызвавшей.

3. **Комбинированный принцип регулирования.** В этих системах одновременно используются принцип регулирования по отклонению и по нагрузке.

4. **Принцип гибкости и согласованности.** Любое действие, выполняемое в рамках общей электронной системы, согласовано со всеми другими действиями, а также с похожими манипуляциями в смежных системах.

5. **Принцип независимого выполнения.** Машина должна осуществлять все производственные процессы самостоятельно. Человеческое участие должно быть сведено к минимуму и заключаться лишь в наблюдении за работой системы.

Некоторые принципы регулирования химических производств:

- **Приоритетное право человека на охрану его жизни и здоровья.**
- **Устойчивое развитие промышленности** за счёт внедрения оптимального комплекса наилучших практик. Они обеспечивают взаимосвязь между производством конкурентоспособной химической продукции, охраной окружающей среды и достижением общей цели — 2020.
- **Совершенствование законодательства** с учётом общепринятых норм международного права в решении глобальных, национальных и региональных проблем, связанных с рациональным регулированием обращения химических веществ и продукции.
- **Повышение качества и защищённости среды обитания** от рисков негативного воздействия химических веществ и продукции.
- **Укрепление многосекторального и многостороннего обеспечения взаимодействия и координации деятельности** в условиях нормативного разграничения полномочий и ответственности федеральных органов исполнительной власти, исполнительных органов государственной власти субъектов РФ, органов

местного самоуправления и субъектов промышленной деятельности в сфере обращения химических веществ и продукции.

- **Прозрачность и научная обоснованность поддержки принятия регулирующих решений**, в том числе в области импортозамещения и поддержки экспорта.

- **Соответствие задач и мер государственного регулирования уровням рисков** негативного воздействия химических веществ и продукции, а также обеспечение системного подхода при реализации мероприятий, направленных на предотвращение указанных рисков или последовательное снижение их уровней.

- **Минимизация влияния принимаемых регулирующих решений** на конкуренцию и международную торговлю.

- **Повышение осведомлённости населения** Российской Федерации в области обеспечения безопасного обращения химических веществ и продукции.

5. Устойчивость систем автоматического регулирования.

Устойчивость системы автоматического регулирования — это способность системы возвращаться к заданному установившемуся состоянию после снятия или приложения внешнего возмущения.

Основным назначением систем автоматического регулирования (САР) является поддержание регулируемой величины на заданном уровне при наличии воздействия на систему внешних возмущений.

Система автоматического регулирования устойчива, если переходные процессы, вызываемые внешними воздействиями (управляющими сигналами или возмущениями), являются затухающими. Если переходные процессы расходящиеся, то система неустойчива и, как правило, неработоспособна.

Для определения устойчивости изучают поведение системы при небольших отклонениях от положения равновесия. Существует три основных вида равновесного состояния: устойчивое, неустойчивое и безразличное.

Если система описывается линейным дифференциальным уравнением, то её устойчивость не зависит от величины возмущения. **Нелинейная система** может быть устойчива при малом возмущении, но неустойчива при большом.

Для определения устойчивости автоматической системы используется прямой метод Ляпунова. Система устойчива, если все корни её характеристического уравнения имеют отрицательные вещественные части, и неустойчива, если хотя бы один корень имеет положительную вещественную часть.

6. Характеристики звеньев в САР.

Различают пять типов звеньев:

1. **Пропорциональное.** Выходная величина повторяет без искажений и запаздывания входную величину.

2. **Инерционное.** При скачкообразном изменении входной величины выходная величина стремится к новому установившемуся значению.

3. **Интегрирующее.** Выходная величина пропорциональна интегралу от входной величины. Чем больше входная величина, тем больше скорость изменения выходной величины.

4. **Дифференцирующее.** Выходная величина пропорциональна производной (дифференциалу) от входной величины. Чем больше скорость изменения сигнала на входе, тем больше значение выходной величины.

5. **Колебательное.** Скачкообразное воздействие на входе приводит к колебаниям выходной величины относительно нового установившегося значения.

7. Позиционные законы (двух и трех позиционные).

Позиционные законы регулирования предполагают, что выходная величина может изменять своё значение дискретно за определённое время в зависимости от величины отклонения. Дискрет (шаг) определяется числом позиций в диапазоне регулирования, что определяет процесс регулирования: двухпозиционный, трёхпозиционный, многопозиционный.

Двухпозиционное регулирование обеспечивает либо максимальное значение выходной величины (нагреватель включён), либо минимальное, нулевое значение (нагреватель выключен). Затвор регулирующего органа двухпозиционных регуляторов может занимать только два положения — открытое или закрытое. Перемещение регулирующего органа из одного положения в другое происходит при достижении регулируемой величиной заранее установленного (заданного) значения и осуществляется скачкообразно.

Трёхпозиционное регулирование имеет три позиции — нижнюю, среднюю и верхнюю. В закон регулирования вводится некоторый интервал регулируемой величины — зона нечувствительности. За пределами данного интервала регулятор включает или верхнюю, или нижнюю позиции, а внутри зоны нечувствительности — среднюю.

8. Пропорциональный закон регулирования.

Пропорциональный закон регулирования (П-закон) выражает регулирование по отклонению регулируемой величины. По этому закону значение сигнала на выходе регулятора всегда строго пропорционально значению его входной величины.

У пропорциональных регуляторов отклонение регулируемой величины X от её заданного значения X_0 вызывает перемещение регулирующего органа на величину, пропорциональную этому отклонению $x = X_0 - X$.

Закон регулирования П-регулятора выражается уравнением: $y = k_{рх}$, где $k_{р}$ — коэффициент пропорциональности, являющийся параметром настройки П-регулятора.

Положительной характеристикой П-регулятора является высокое быстродействие: при отклонении регулируемой величины от заданного значения регулятор выдаёт регулирующее воздействие, пропорциональное величине отклонения, что обеспечивает быструю компенсацию возмущения.

Существенным недостатком П-регулятора является наличие статической ошибки в переходном процессе АСР с П-регулятором.

9. Интегральный закон регулирования.

Интегральный закон регулирования — это процесс регулирования, при котором **управляющее воздействие пропорционально интегралу от ошибки**. Проще говоря, выходной сигнал регулятора будет воздействовать на регулирующий орган до тех пор, пока смещение не будет устранено и регулируемая переменная не вернётся к заданному значению.

Основное достоинство интегрального регулятора — статическая ошибка регулирования всегда равна нулю. Вместе с тем И-регулятор вызывает уменьшение устойчивости переходного процесса и системы в целом.

Настроечным параметром в этом случае является коэффициент интеграции (время интегрирования) K_I .

Техническая реализация И-регулятора представляет собой усилитель постоянного тока с ёмкостной отрицательной обратной связью.

10. Настройки, динамические характеристики

Настройки автоматических систем и регуляторов — это совокупность измеряемых параметров, обеспечивающих благоприятное или оптимальное протекание процессов управления и регулирования.

Параметры настройки регуляторов — это коэффициенты, которые можно менять для изменения динамических характеристик регулятора и обеспечения требуемого качества

работы автоматической системы в целом. К таким параметрам относятся, например: коэффициент передачи регулятора, постоянная времени интегрирования, дифференцирования, издрорма и предварения. [2](#)

Динамическая характеристика объекта — это зависимость выходной величины во времени в переходном режиме при определённом законе изменения входной величины. Динамические характеристики включают в себя временные и частотные характеристики.

Временная характеристика, или кривая разгона — это динамическая характеристика, полученная при однократном мгновенном скачкообразном возмущении. По кривой разгона определяют следующие динамические параметры: запаздывание, постоянную времени и коэффициент передачи.

Частотная характеристика показывает зависимость изменения выходной величины от входной, если последняя изменяется по синусоидальному закону.

11. Пропорционально-интегральный (ПИ).

Пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор — это регулятор, изменение выходной величины которого пропорционально как изменению входной величины, так и интегралу её изменения.

Закон регулирования ПИ-регулятора выражается уравнением, где T_i — время интегрирования регулятора, или время издрорма. Коэффициент пропорциональности k_p и постоянная времени T_i являются параметрами настройки ПИ-регулятора.

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид: $W_{PI}(p) = k_p(T_i p + 1)/T_i p$.

В динамическом отношении ПИ-регулятор представляет собой систему из двух параллельно включенных регуляторов: пропорционального и интегрального.

Некоторые достоинства ПИ-регулятора:

- способен обеспечить нулевую статическую ошибку регулирования;
- простота настройки, которая обусловлена тем, что фактически настраиваются только два параметра: коэффициент усиления K_p и постоянная времени интегрирования T_i ;
- малая чувствительность к шумам в канале измерения (в отличие от ПИД-регулятора).

12. Пропорционально-дифференциальный (ПД).

Пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор объединяет функцию пропорционального регулятора с выполнением операции дифференцирования отклонения сигнала от величины уставки.

Закон регулирования ПД-регулятора выражается уравнением, где T_d — время дифференцирования, или время предварения регулятора, характеризующее степень влияния воздействия по производной на величину регулирующего воздействия. Коэффициент пропорциональности k_p и постоянная времени T_d ПД-регулятора являются параметрами его настройки.

Передаточная функция ПД-регулятора: $W_{PD}(p) = k_p(1 + T_d p)$.

Преимущества ПД-регулятора: дополнительное воздействие по скорости отклонения регулируемой величины от заданного значения положительно влияет на процесс регулирования. Это является преимуществом ПД-регуляторов по сравнению с П-регуляторами.

Недостатки ПД-регулятора: малая точность и чувствительность к шумам.

13. Пропорционально-интегральнодифференциальный (ПИД). Настройки динамических характеристик.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор — это устройство для автоматического поддержания в заданном интервале одного или нескольких параметров.

Управляющий сигнал ПИД-регулятора — сумма трёх составляющих:

1. **Пропорциональная составляющая** формируется исходя из разницы заданной величины параметра и его фактического значения. Чем больше отклонение характеристики, тем выше уровень пропорционального сигнала.

2. **Интегральная составляющая** пропорциональна интегралу по времени от отклонения величины контролируемой характеристики. Она позволяет регулятору со временем учесть статическую ошибку регулирования и устранить её.

3. **Дифференциальная составляющая** увеличивается и уменьшается пропорционально скорости изменения контролируемого параметра.

Регуляторы такого типа широко применяются в локальных системах управления промышленным оборудованием, централизованных АСУТП, в робототехнике.

Настройки ПИД-регулятора сводятся к подбору величин трёх коэффициентов, так чтобы устройство поддерживало заданный параметр на определённом уровне.

Пропорциональный коэффициент (k_P) отвечает за скорость выхода на установленное значение, при увеличении коэффициента увеличивается управляющий сигнал. При дальнейшем увеличении k_P реальная система теряет устойчивость и начинаются колебания.

Интегральный коэффициент (k_I) позволяет устранить статическую ошибку. При увеличении k_I растёт скорость компенсации накопившейся ошибки, что позволяет вывести систему точно к заданному значению с течением времени. Если система медленная, а k_I слишком большой — интегральная сумма сильно вырастет и произойдёт перерегулирование.

Дифференциальный коэффициент (k_D) отвечает за стабильность системы, при увеличении коэффициента система не даёт меняться слишком быстро. В то же время k_D может стать причиной неадекватного поведения системы и постоянных скачков управляющего сигнала, если значение с датчика шумит.

Динамические характеристики ПИД-регулятора: передаточная функция, частотные характеристики и кривая разгона. В динамическом отношении эти регуляторы представляют собой систему из трёх параллельно включенных звеньев: безынерционного, интегрирующего и идеального дифференцирующего.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

1. Лекция №1. Автоматизация производства. Введение. <https://multiurok.ru/files/liektsiia-1-avtomatizatsiia-proizvodstva-vviedeniie.html>
2. Автоматизация производства https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0
3. История развития автоматизации на производстве <https://mrcheck.ru/blog/detail/istoriya-razvitiya-avtomatizatsii-na-proizvodstve/>
4. Часть 1. История систем автоматизации <https://habr.com/ru/articles/698406/>
5. ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ - ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ <https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-avtomaticheskogo-regulirovaniya-istoriya-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya>
6. Автоматические системы регулирования <https://portal.tpu.ru/SHARED/a/AWOLF/academics/SU/recLiter/posobie.pdf>
7. Анализ систем автоматического регулирования <https://nizrp.narod.ru/metod/kafinfizmtex/5.pdf>
8. Краткий очерк истории развития систем автоматического управления <https://megalektsii.ru/s51404t6.html>
9. Студенческий научный форум – 2023 <https://scienceforum.ru/2023/article/2018032372>
10. Устройство автоматического регулятор Ползунова <https://mega-predmet.com/1-78720.html>
11. Автоматический регулятор Ползунова <https://works.doklad.ru/view/sDbDirg8C9E/all.html?ysclid=m6s1xp741333959730>
12. Первые промышленные регуляторы. Принципы регулирования. <https://studfile.net/preview/7646844/page:2/>
13. Автоматический регулятор И.И. Ползунова <https://helpiks.org/6-83468.html>
14. Автоматическое регулирование <https://mega-predmet.com/1-79109.html>
15. Разновидности систем автоматического управления с обратными связями https://de.donstu.ru/CDOCourses/structure/mash_stroit_tech/masp/333/book/%D0%93%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%B0%20%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D1%8B%20%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F/1.3%20%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF%D1%8B%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%A1%D0%90%D0%A3/1.3.1%20%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF%D1%8B%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%A1%D0%90%D0%A3.htm
16. Автоматизация производства: виды, уровни, этапы внедрения <https://www.alpha-intech.com/blog/ypravlenie-proizvodstvom/avtomatizatsiya-proizvodstva/>
17. Основные принципы автоматизации производственных процессов <https://www.akruks.net/article/avtomatizatsija/p568-osnovnye-printsipy-avtomatizatsii/>
18. Приказ Минпромторга России от 31.12.2015 N 4372 "Об утверждении Концепции развития системы государственного регулирования обращения химических веществ и продукции и плана мероприятий по ее реализации" https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_306461/afd44ec27365fec1a9c4a0e9ed9d974cb109eb62/
19. Определение устойчивости систем автоматического регулирования https://spravochnik.ru/avtomatizaciya_tehnologicheskikh_processov/opredelenie_ustoychivosti_sistem_avtomaticheskogo_regulirovaniya/
20. НЕПРЕРЫВНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ https://www.omgtu.ru/general_information/faculties/radio_engineering_department/departament_of_design_and_production_of_radio_quot/uchebno_metodicheskaya_rabota/Munin/lesson_6_1.pdf
21. Устойчивость и качество систем автоматического регулирования <https://studizba.com/lectures/inzhenerija/avtomatizaciya-sudovyh-jenergeticheskikh-ustanovok/35484-ustojchivost-i-kachestvo-sistem-avtomaticheskogo-regulirovaniya.html>
22. УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ http://moodle.spsu.ru/pluginfile.php/59235/mod_resource/content/1/%D0%A3%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B9%D1%87%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C%20%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%20%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D1%80%D0%B5%D0%B3%D1%83%D0%BB%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F.pdf
23. Характеристика звеньев САР <https://multiurok.ru/files/opornyi-konspekt-po-teme-kharakteristika-zvenjev-sar>
24. Типовые звенья САР и их характеристики <https://studfile.net/preview/2861581/page:29/>

25. Законы регулирования https://masters.donntu.ru/2007/kita/tomilin/library/oao_npp_etalon.htm
26. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
<https://kubsau.ru/upload/iblock/66b/66b98c3f69450d7d0b0fac923ba9d2da.pdf>
27. Позиционные (релейные) САР <https://project2425235.tilda.ws/glava3>
28. ПОНЯТИЕ О ЗАКОНАХ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ
http://moodle.spsu.ru/pluginfile.php/59255/mod_resource/content/1/%D0%9F%D0%BE%D0%BD%D1%8F%D1%82%D0%B8%D0%B5%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D1%85%D0%B8%D0%B5%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%D0%B8%D0%B5%D0%B3%D1%83%D0%BB%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F.pdf
29. Автоматические регуляторы и исполнительные устройства
https://moodle.kstu.ru/pluginfile.php/299008/mod_resource/content/1/%D0%9B%D0%95%D0%9A%D0%A6%D0%98%D0%AF%204%20%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5%D0%B3%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%8B%D0%B8%D0%B8%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5%D0%B3%D1%83%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0.pdf
30. Типовые законы регулирования. Одноконтурные САР <https://project2425235.tilda.ws/glava8>
31. Принципы построения АСУ ТП <https://proplast.ru/articles/asutp/>
32. Интегральное регулирование <https://www.kipiavp.ru/info/integralnoe-regulirovanie.html>
33. Основы теории управления https://ikt.muctr.ru/images/info/3OTY_Lecture_6.pdf
34. Законы регулирования <https://spravochnik.ru/lektoriy/zakony-regulirovaniya/>
35. НАСТРОЙКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ
https://libr.aues.kz/facultet/103_FRTS/140_Kafedra_avtomatizatsii_i_upravleniya/308_Nastroyka_sistem_avtomaticheskogo_upravleniya_i_regulirovaniya/slievL27yH9plaO5GjgEXqDFZN1z3.pdf
36. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
http://moodle.spsu.ru/pluginfile.php/59236/mod_resource/content/1/%D0%A5%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D0%B1%D1%8A%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%20%D1%80%D0%B5%D0%B3%D1%83%D0%BB%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F.pdf
37. Настройка параметров регуляторов в системах управления
<https://spravochnik.ru/lektoriy/nastroyka-parametrov-regulyatorov-v-sistemah-upravleniya/>
38. ПИ-регулятор <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%98-%D1%80%D0%B5%D0%B3%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%BE%D1%80>
39. ПИД-управление в нестрогом изложении <https://fast-project.ru/upload/PID.pdf>
40. Что такое ПИД регулятор преобразователя частоты - схема подключения
<https://drives.ru/stati/pid-regulyator/>
41. Методы настройки ПИД-регулятора <https://drives.ru/stati/nastroyka-pid-regulyatora/>
42. ПИД регулятор <https://alexgyver.ru/lessons/pid/>
43. Настройка ПИД-регулятора температуры <https://rusautomation.ru/articles/nastroyka-pid-regulyatora-temperatury/>