

11 Управление объектами со значительными инерционностью и запаздыванием

Многие промышленные объекты управления (ОУ) характеризуются значительными инерционностью, запаздыванием и уровнем возмущений. Особенно это характерно для процессов горно-металлургического комплекса, энергетики, химии и строительной индустрии. Технологическое оборудование, реализующее эти процессы, зачастую имеет значительные размеры, то есть распределено в пространстве, а управляющие воздействия ограничены, вследствие чего возникают эффекты запаздывания и инерционности. Применение обычных одноконтурных систем часто не обеспечивает хорошее качество регулирования. Почему это так? Рассмотрим ЛСУ таким ОУ, работающую по принципу обратной связи. Возмущение, действующее на ОУ, из-за инерционности и запаздывания появится (проявится) на выходе объекта через значительное время. В течение этого времени технологический процесс будет находиться под действием этого возмущения, то есть отклонится от нормы. Далее процесс отработки этого возмущения также займет значительное время, в итоге возмущение будет оставаться некомпенсированным примерно в течение двойного суммарного времени инерционности и запаздывания. В итоге мы будем наблюдать большие динамические ошибки и длительные переходные процессы. Приведем простой пример.

Пример 11.1. Имеем теплообменник воздух-воздух, например, экономайзер. Это закрытый бак, в который подается воздух, этот воздух нужно нагреть, назовем его нагреваемый воздух. Внутри бака помещены змеевики (изогнутые трубы), через которые пропускается горячий воздух, который должен отдать свое тепло, назовем его греющим воздухом. Такие теплообменники широко используются в энергетике, химии, металлургии и др. областях.

Задача состоит в том, чтобы поддерживать температуру нагреваемого воздуха на выходе теплообменника путем изменения подачи греющего воздуха. Мы ставим термодатчик на выходе нагреваемого воздуха, устанавливаем регулируемый клапан на трубопроводе греющего воздуха и посредством регулятора автоматически стабилизируем температуру нагреваемого воздуха. Это изображено на рисунке 11.1.

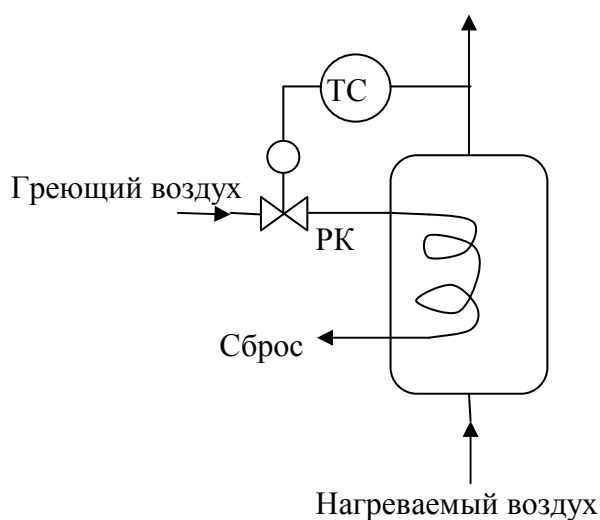


Рисунок 11.1 – Одноконтурная САР теплообменника. ТС – регулятор температуры; РК – регулируемый клапан.

Допустим, что по нашей технологии давление греющего воздуха примерно постоянное, но нагреваемого воздуха нам нужно то больше, то меньше, то есть его расход все время изменяется. Тогда из-за инерционности процесса нагрева качество регулирования температуры нагреваемого воздуха будет невысоким. А именно при увеличении этого расхода температура нагреваемого воздуха на выходе теплообменника начнет падать и благодаря инерционности процесса теплообмена регулятор не в состоянии быстро парировать это падение, в итоге будут «провалы» температуры. При уменьшении расхода все наоборот. В этой системе изменяющийся расход нагреваемого воздуха является основным возмущением для системы регулирования температуры. Это возмущение сильно ухудшает качество регулирования.

Можно ли как-то улучшить ситуацию? Оказывается, можно. Нужно поставить датчик расхода нагреваемого воздуха и при его увеличении не ждать, когда упадет температура, а сразу приоткрывать регулирующий клапан на трубопроводе греющего воздуха на определенную величину. То есть мы основное возмущение (расход нагреваемого газа) делаем наблюдаемым и информацию о расходе подаем в регулятор. Функциональная схема этой системы изображена на рисунке 11.2.

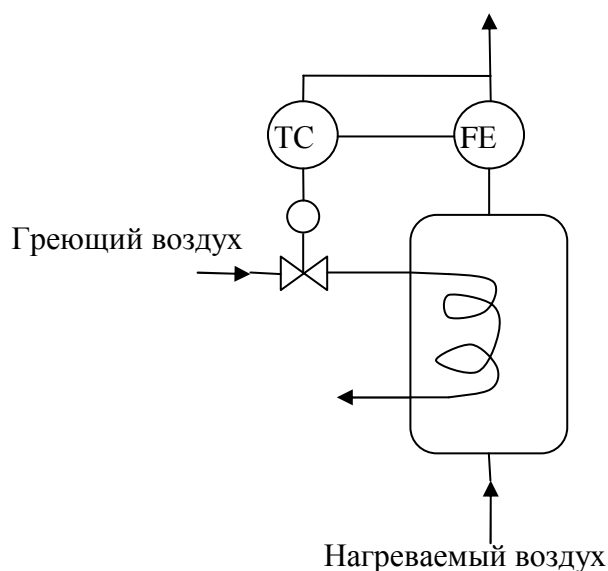


Рисунок 11.2 – Комбинированная САР температуры нагреваемого воздуха на выходе теплообменника. FE – датчик расхода; TC – регулятор температуры; РК – регулирующий клапан.

Конец примера 11.1.

Такой принцип регулирования, как известно, называется принципом компенсации. Теперь регулятор по обратной связи будет только корректировать неточности управления по принципу компенсации и парировать другие, менее значимые возмущения. Здесь мы реализуем комбинированный принцип управления: компенсации и обратной связи. Такая система называется системой комбинированного управления.

Рассмотренный пример является характерным, из него следует вывод: для повышения качества регулирования целесообразно использовать, помимо информации о регулируемой переменной, дополнительную информацию об основных возмущениях ОУ, которая может ускорить процесс компенсации возмущений.

Итак: Для повышения качества управления объектами со значительной инерционностью и запаздыванием целесообразно использовать дополнительную информацию об основных возмущениях объекта управления, которая может ускорить процесс компенсации возмущений.

Система управления, в которой используются совместно принципы компенсации и обратной связи, называется системой комбинированного управления.

Структурная схема комбинированной системы управления показана на рисунке 11.3.

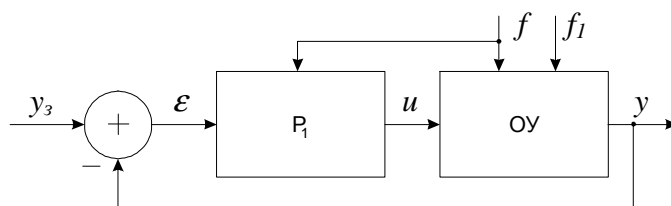


Рисунок 11.3 – Структура комбинированной системы управления.

Другая возможность улучшения динамических показателей качества промышленной САР появляется, если доступны для оперативного контроля промежуточные выходные переменные ОУ, быстрее реагирующие на возмущения, чем по основному каналу управления. Снова рассмотрим пример.

Пример 11.2. Имеем тот же самый теплообменник, что в Примере 11.1, но с другой ситуацией по основным возмущениям. Теперь допустим, что по нашей технологии давление греющего воздуха может изменяться в широких пределах, но расход нагреваемого воздуха примерно постоянный. Тогда опять из-за инерционности процесса нагрева качество регулирования температуры нагреваемого воздуха будет невысоким в системах как на рисунке 11.1, так и рисунке 11.2. А именно при фиксированном положении регулирующего клапана расход греющего воздуха будет разным, что приведет к изменению температуры нагреваемого воздуха на выходе теплообменника. Опять благодаря инерционности процесса теплообмена САР на рисунке 11.1 не в состоянии быстро парировать эти изменения расхода. В этой системе теперь уже изменяющийся расход греющего воздуха является основным возмущением для системы регулирования температуры.

Как улучшить ситуацию? Способ улучшения следует из описания технологии и возможностей автоматизации. Нужно нашу систему регулирования температуры дополнить системой автоматического регулирования расхода греющего воздуха (это сделать несложно). Для этого на трубопроводе греющего воздуха нужно установить датчик расхода и регулятор этого расхода с воздействием на существующий регулирующий клапан. А как же связать эту САР расхода с нашей системой регулирования температуры? Ведь основная цель – регулирование температуры на выходе. Очень просто: нужно САР расхода сделать подчиненной для САР температуры. Для этого управляющее воздействие САР температуры подать в качестве задания для САР расхода греющего воздуха. Получается, что САР расхода стала объектом управления для САР температуры. Такая система называется каскадной системой регулирования, в примере 11.2 это двухкаскадная система регулирования. Функциональная схема этой системы изображена на рисунке 11.4.

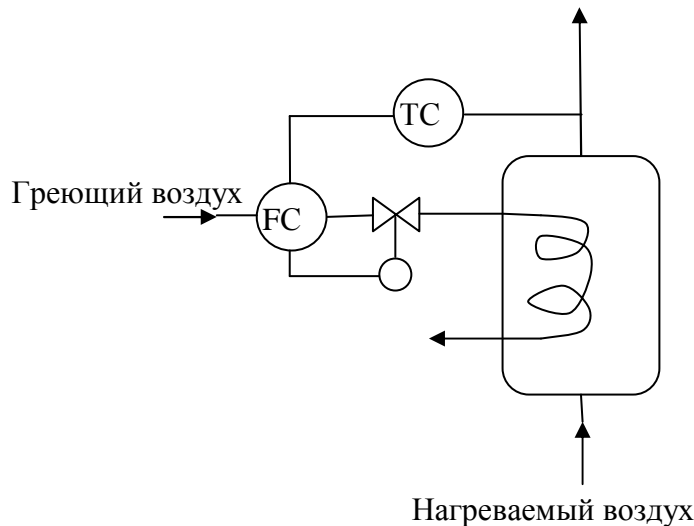


Рисунок 11.4 – Каскадная САР температуры нагреваемого воздуха на выходе теплообменника. FC – регулятор расхода греющего воздуха; TC – регулятор температуры.

Конец примера 11.2.

Пример 11.2 иллюстрируют эффективность применения промежуточных выходных переменных ОУ. При этом строится каскадная многоконтурная система управления, в которой заданием для каждого внутреннего контура автоматической стабилизации промежуточной переменной является управляющее воздействие своего внешнего контура.

Отметим, что каскадная система регулирования может содержать более двух каскадов.

Итак: Для повышения качества управления объектами со значительной инерционностью и запаздыванием целесообразно использовать информацию о промежуточных выходных переменных объекта управления, которая может ускорить процесс компенсации возмущений.

Система управления, в которой используются внутренние контуры автоматического регулирования промежуточных выходных переменных объекта управления, называется каскадной системой управления. Заданием для каждого внутреннего контура является управляющее воздействие своего внешнего контура.

Структурная схема каскадной системы управления показана на рисунке 11.5.

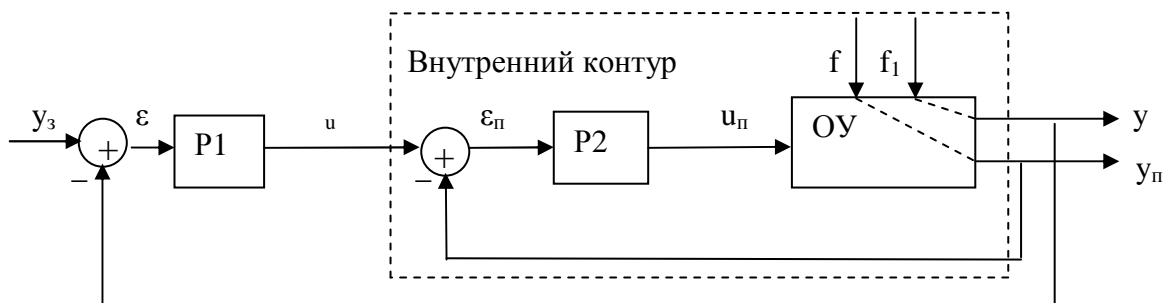


Рисунок 11.5 – Структура каскадной (двухкаскадной) системы управления.

Таким образом, эффективным средством улучшения качества управления ОУ со значительными инерционностью, запаздыванием и уровнем возмущений является

применение комбинированных и каскадных систем управления. Создание таких систем связано с дополнительными затратами, поэтому, прежде чем их использовать, нужно оценивать издержки и выгоду, связанные с применением этих систем.

Третьим направлением улучшения работы САУ объектами с запаздыванием является применение регуляторов с компенсацией этого запаздывания. Их мы кратко рассмотрим в конце лекции.

12 Расчет комбинированных и каскадных систем управления

12.1 Комбинированные системы управления.

Общая структура комбинированной системы управления была представлена на рисунке 11.3. Из этого рисунка видно, что компенсации подлежит возмущение f . Расчет цепей компенсации в регуляторе основан на самой идее компенсации: цепь компенсации предназначена для устранения действия возмущения на ОУ так, чтобы выходная переменная ОУ в системе управления не зависела от f . Отметим, что согласно рисунку 11.3 сигнал компенсации будет являться частью управляющего воздействия u .

Предположим как обычно, что возмущение f аддитивное (то есть оно складывается с переменными ОУ) и объект управления (ОУ) по каналам действия этого возмущения и управления описывается линейным уравнением в области изображений по Лапласу

$$y(s) = W_F(s) \cdot f(s) + W_{OY}(s) \cdot u(s), \quad (12.1)$$

где $W_F(s)$, $W_{OY}(s)$ – передаточные функции ОУ по каналам возмущения и управления.

Из (12.1) видно, что для компенсации f управляющее воздействие u , формируемое регулятором, должно содержать слагаемое, которое, будучи подставлено в (12.1), сократится с первым слагаемым (12.1) и тем самым устранил действие возмущения f на выходную переменную y . Ясно, что второе слагаемое будет реализовывать управление по обратной связи. Тогда уравнение регулятора также в области изображений можно записать так

$$u(s) = u_1(s) + u_k(s) = W_p(s) \cdot \varepsilon(s) + W_k(s) \cdot f(s), \quad (12.2)$$

где $W_p(s)$, $W_k(s)$ – передаточные функции регулятора по каналам рассогласования $\varepsilon(s)$ и возмущения $f(s)$.

Из (12.1) и (12.2) следует более детальная структурная схема комбинированной системы управления (рисунок 12.1).

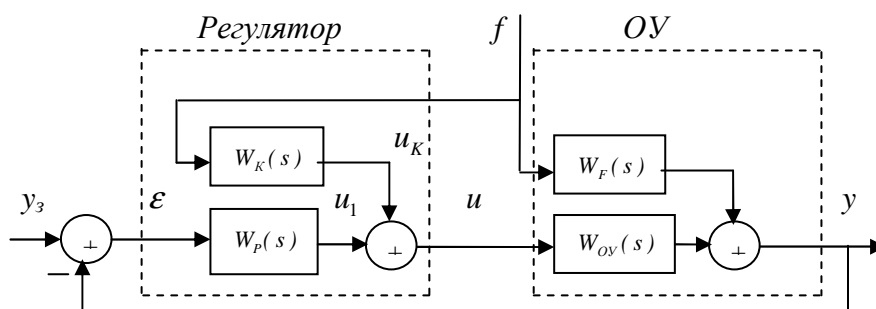


Рисунок 12.1 – Детальная структура комбинированной системы управления

Из рис. 12.1 видно, что система компенсации не взаимодействует с контуром обратной связи и ее можно рассчитывать отдельно. Тогда отделим от контура обратной связи цепь компенсации $W_k(s)$, т.е. будем считать, что $u_1(s) = 0$, это удобно для нахождения $W_k(s)$. Для этого подставим (12.2) в (12.1) при условии, что $u_1(s) = 0$

$$y(s) = W_F(s) \cdot f(s) + W_{OY}(s) \cdot W_K(s) \cdot f(s) = (W_F(s) + W_{OY}(s) \cdot W_K(s))f(s). \quad (12.3)$$

Поскольку должно быть $y(s) = 0$, выражение в скобках должно быть равно нулю, то есть

$$W_F(s) + W_{OY}(s) \cdot W_K(s) = 0, \text{ или } W_K(s) = -\frac{W_F(s)}{W_{OY}(s)}. \quad (12.4)$$

Выражение (12.4) определяет передаточную функцию динамического компенсатора $W_K(s)$ в составе регулятора.

Таким образом: *Для обеспечения независимости (инвариантности) системы регулирования по отношению к данному возмущению необходимо установить динамический компенсатор, передаточная функция которого равна отношению передаточных функций объекта по каналу возмущения и регулятора по каналу управления, взятое с обратным знаком:* $W_K(s) = -\frac{W_F(s)}{W_{OY}(s)}$.

Система на рисунке 12.1, в которой $W_K(s)$ рассчитано по (12.4), производит компенсацию в динамике, то есть полную компенсацию возмущения f . Казалось бы, все в порядке, задача решена. Однако при реализации $W_K(s) = -\frac{W_F(s)}{W_{OY}(s)}$ как правило, возникают проблемы. Дело в том, что f обычно действует в самом ОУ, следовательно, характеристический полином передаточной функции по каналу возмущения $W_F(s)$ имеет меньший порядок, чем полином передаточной функции по каналу управления $W_{OY}(s)$. Но тогда из (12.4) следует, что в $W_K(s)$ порядок полинома числителя будет больше, чем порядок полинома знаменателя. Это значит, что для реализации $W_K(s)$ необходимо идеальное дифференцирование, что физически невозможно.

Выход из этого положения заключается в приближенном представлении $W_K(s)$ некоторым физически реализуемым звеном. Конечно, о точной компенсации уже говорить нельзя и в каждом конкретном случае нужно выполнять анализ полученной комбинированной системы с приближенной компенсацией. Один из общеизвестных вариантов – замена идеальных дифференциаторов физически реализуемым последовательным соединением фильтра низких частот (например, апериодического звена первого порядка) и идеального дифференциатора. Параметры фильтра выбираются так, чтобы обеспечить приближенную компенсацию в характерном диапазоне частот. Но здесь, как и для ПИД-регулятора возникает проблема помехозащищенности.

Другой простейший вариант – компенсация в статике. Он заключается в замене $W_F(s)$ ее коэффициентом передачи в статике. Тогда и $W_K(s)$ становится коэффициентом, обратным к коэффициенту передачи $W_F(s)$ в статике. В ряде случаев это дает хороший эффект.

Поле определения блока компенсации нужно рассчитать часть системы управления, работающей по обратной связи обычными методами в предположении отсутствия цепей компенсации. После полного расчета нужно выяснить качество работы системы, например, моделированием на ЭВМ.

12.2 Каскадные системы управления.

Рассмотрим расчет каскадной системы на примере такой системы, содержащей два каскада. Структура такой системы управления была представлена на рисунке 11.5.

ОУ имеет основную управляемую переменную y и промежуточную переменную y_{II} . Рассмотрен вариант, когда основное возмущение f действует на промежуточную переменную y_{II} . Структура содержит внутренний (вспомогательный) регулятор P2 и внешний (основной) регулятор P1.

Внутренний регулятор образует внутренний контур регулирования, который предназначен для быстрой компенсации основного возмущения f . Следовательно, от внутреннего контура прежде всего требуется высокое быстродействие, отсутствие статической ошибки регулирования для него не обязательно. Статическая ошибка будет ликвидирована основным контуром. Для высокого быстродействия внутреннего контура промежуточную переменную нужно выбирать так, чтобы инерционность и запаздывание по каналу: управляющее воздействие – промежуточная переменная были минимальными. Сразу же отметим, что для этого контура может подойти простейший П-регулятор. Он прост в настройке и обеспечивает высокое быстродействие.

Внешний (основной) регулятор несет основную нагрузку по регулированию основной переменной, поэтому он, как правило содержит интегральную (И) составляющую. Обычно это ПИ или ПИД-регулятор. Этот контур, поскольку ОУ характеризуется значительной инерционностью и запаздыванием, работает в более низком диапазоне частот, чем внутренний контур. Это облегчает расчет каскадной системы.

В каскадной системе оба контура регулирования взаимно влияют друг на друга, поэтому расчет такой системы лучше вести методом итераций. На каждой итерации обычными методами рассчитывается один регулятор при условии, что второй регулятор известен, он рассчитан на предыдущей итерации. На нулевой итерации считается, что второго регулятора нет. Расчет на каждой итерации ведется обычными методами. Предлагается следующий метод расчета.

1) На первом этапе (на нулевой итерации) рассчитывается внутренний контур регулирования при условии, что внешний контур разомкнут, то есть внешнего регулятора нет. Исходной для расчета является передаточная функция ОУ по каналу: управляющее воздействие – промежуточная управляемая переменная $W_{OB}(s)$. В результате расчета получают передаточную функцию внутреннего регулятора $W_{PB}(s)$. Тогда передаточная функция замкнутого внутреннего контура $W_{ЗCB}(s)$ имеет вид

$$W_{ЗCB}(s) = \frac{W_{PB}(s)W_{OB}(s)}{1 + W_{PB}(s)W_{OB}(s)}. \quad (12.5)$$

2) На втором этапе (первая итерация) рассчитывают внешний контур регулирования. Исходной для расчета является передаточная функция ОУ по каналу: управляющее воздействие – основная управляемая переменная $W_O(s)$, при этом считают, что объект управления для внешнего контура содержит внутренний контур с передаточной функцией $W_{ЗCB}(s)$. В итоге получают передаточную функцию основного регулятора $W_P(s)$. Тогда передаточная функция замкнутой каскадной системы $W_{ЗC}(s)$ записывается обычным образом

$$W_{ЗC}(s) = \frac{W_P(s)W_O(s)}{1 + W_P(s)W_O(s)}. \quad (12.6)$$

Часто после этих двух итераций расчет заканчивается, доводку системы в целом ведут после монтажа уже на реальном ОУ. Но возможны и дальнейшие итерации. Тогда на третьем этапе рассчитывается опять внутренний контур, но уже при наличии основного регулятора.

Для проверки эффекта от использования внутреннего контура полезно рассчитать систему регулирования без внутреннего контура и сравнить результат с вариантом наличия такого контура. Сравнение заключается в анализе переходных функций той и другой системы по каналом задания и возмущений.

12.3 Системы регулирования с регулятором (компенсатором) Смита.

Если ОУ обладает существенным запаздыванием, то применение типовых регуляторов может оказаться неэффективным. Запаздывание смещает фазу выходного сигнала объекта по отношению к его входному сигналу, АФХ разомкнутой системы поворачивается по часовой стрелке и опасно приближается к точке с координатами (-1,0). По опыту автоматизации и расчетам систем управления типовые регуляторы оказываются неэффективными при $\tau_{об}/T_{об} \geq 0,2 \dots 0,4$. Конечно, ПИ-регулятор, рассчитанный должным образом, обеспечит устойчивость замкнутой системы регулирования объектом с большим запаздыванием, но качество регулирования может оказаться невысоким. Если требуются хорошие характеристики работы системы, то нужно использовать специальные алгоритмы регулирования и регуляторы, обеспечивающие компенсацию чистого запаздывания.

Разработано несколько разновидностей компенсационных регуляторов, наиболее известен регулятор (предиктор) Смита. Идея построения этого регулятора заключается в следующем. Параллельно ОУ с запаздыванием $W_o(s)e^{-\tau_s}$ устанавливается динамический компенсатор $W_K(s)$. Суммарный сигнал с выходов ОУ и компенсатора сравнивается с заданием и подается на обычный регулятор $W_p(s)$ (рисунок 12.2). Компенсатор нужно выбрать так, чтобы эквивалентная передаточная функция параллельного соединения ОУ и компенсатора была равна передаточной функции ОУ без запаздывания $W_o(s)$. Это записывается в виде (12.7).

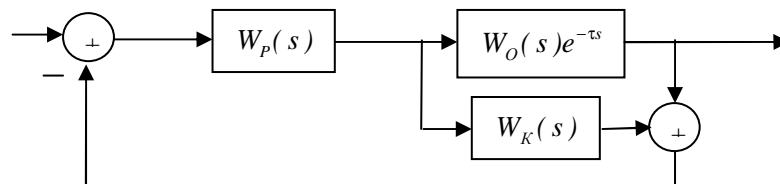


Рисунок 12.2 – Структура системы с компенсатором

$$W_o(s)e^{-\tau_s} + W_K(s) = W_o(s) \quad (12.7)$$

Из (12.7) получаем передаточную функцию компенсатора

$$W_K(s) = W_o(s)(1 - e^{-\tau_s}) \quad (12.8)$$

Передаточная функция замкнутой системы с предиктором Смита с учетом (12.7), (12.8) имеет вид (выведите ее самостоятельно!)

$$W_{PK}(s) = \frac{W_p(s)W_o(s)}{1 + W_p(s)W_o(s)} e^{-\tau_s} \quad (12.9)$$

Из (12.9) видно, что запаздывание как бы выведено из основного контура регулирования (создан эффект компенсации запаздывания) и регулятор $W_p(s)$ можно рассчитывать обычным образом без учета вредного влияния запаздывания.