

УДК 621.18-5

ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ВПРЫСКОВ

Селюк И.Г.

Научный руководитель – д.т.н. профессор Кулаков Г.Т., к.э.н. доцент Кравченко В.В.

Регулирование температуры пара последовательно включенных перегревательных участков первичного тракта осуществляют с помощью АСР впрысков, работающих по двухимпульсной схеме.

Поверхности нагрева отдельных участков, соединительные трубопроводы и паросборные коллекторы, а также устройства впрыска охлаждающей воды образуют объект регулирования.

Температуру на выходе каждого участка стабилизируют с помощью автономных автоматических регуляторов, воздействующих на впрыскивающие устройства, устанавливаемые между отдельными поверхностями нагрева.

На систему действуют: внутреннее возмущение первого и второго впрыска, внешнее возмущение первого и второго впрыска, скачок задания первого и второго впрыска. Внутренние возмущения не опасны, так как обрабатываются вторым регулятором очень хорошо. Внешнее возмущение первого впрыска воспринимается вторым впрыском как внутреннее и тоже обрабатывается достаточно хорошо. В качестве наиболее опасного возмущения принято внешнее возмущение второго впрыска, так как оно сразу проходит на выход системы и может привести к появлению статической ошибки регулирования, обусловленной выходом из расчетного диапазона регулирующего органа. Также следует учитывать в рассматриваемой схеме регулирующее воздействие первого впрыска как дополнительное внутреннее возмущение для второго впрыска, так как оно изменяет расход пара, проходящего через пароперегреватель, а значит и влияет на конечный результат качества регулирования.

Исходные данные для моделирования:

$K_{оп} = 11,6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{т}/\text{ч}$; $K_{ин} = 2,6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{т}/\text{ч}$; $T_{ин} = 111,3\text{с}$; $\sigma_{ин} = 35,8\text{с}$; $T_{оп} = 27,6\text{с}$; $\sigma_{оп} = 6,4\text{с}$; $\tau_y = 154\text{с}$.

Схема представляет собой последовательное соединение двух САР с дифференциатором – (САР с Д). Выходная регулируемая величина 1-ой САР с Д воспринимается второй как внутреннее возмущение. Недостатком данной схемы является отсутствие увязки задания первого и второго впрысков, то есть при выходе регулируемой величины второго впрыска из диапазона регулирования отсутствует возможность скорректировать задание первому впрыску и тем самым ликвидировать отклонение регулируемой величины от допустимого значения.

Для улучшения качества регулирования при внешнем возмущении использовались различные методы.

1. Плановое изменение нагрузки

При плановом изменении нагрузки за основу берется САР с инвариантностью по f_2 . Но она несколько видоизменяется: в цепочку f_2 - $W_B(p)$ добавляют звено чистого запаздывания.

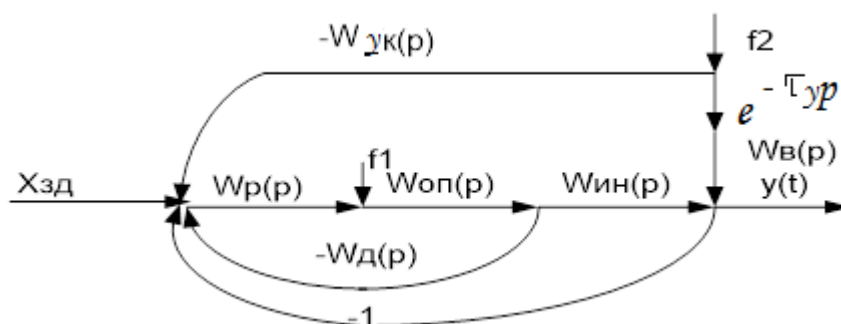


Рисунок 1. Структурная схема САР с Д при плановом изменении нагрузки

Передаточную функцию устройства компенсации находим из следующего равенства.

$$W_{\text{ук}}(p) \cdot W_{y, X_{3\partial}}^{\text{opt}}(p) = (1 - W_{y, X_{3\partial}}^{\text{opt}}(p)) \cdot W_{\text{г}}(p) \cdot e^{-t_{3\partial}}, \quad (1)$$

$$W_{\text{ук}}(p) = \left(\frac{1}{W_{y, X_{3\partial}}^{\text{opt}}(p)} - 1 \right) \cdot W_{\text{г}}(p) \cdot e^{-t_{3\partial}}, \quad (2)$$

$$W_{\text{ук}}(p) = \left(\frac{1}{\frac{e^{\tau_y \cdot p}}{T_{3\partial} p + 1}} - 1 \right) \cdot W_{\text{г}}(p) \cdot e^{-t_{3\partial}}, \quad (3)$$

$$W_{\text{ук}}(p) = \left(\frac{1}{\frac{1}{(T_{3\partial} p + 1) \cdot (\tau_y p + 1)}} - 1 \right) \cdot W_{\text{г}}(p) \cdot e^{-t_{3\partial}}, \quad (4)$$

$$W_{\text{ук}}(p) = ((T_{3\partial} p + 1) \cdot (\tau_y p + 1) - 1) \cdot W_{\text{г}}(p) \cdot e^{-t_{3\partial}}, \quad (5)$$

$$W_{\text{ук}}(p) = (T_{3\partial} \cdot \tau_y p^2 + (T_{3\partial} + \tau_y) p + 1 - 1) \cdot W_{\text{г}}(p) \cdot e^{-t_{3\partial}}, \quad (6)$$

$$W_{\text{ук}}(p) = (T_{3\partial} + \tau_y) p \cdot \frac{K_{\text{г}}}{T_{\text{г}} p + 1} \cdot \frac{1}{t_{3\partial} p + 1}, \quad (7)$$

$$W_{\text{ук}}(p) = \frac{(T_{3\partial} + \tau_y) p \cdot K_{\text{г}}}{(T_{\text{г}} p + 1)(t_{3\partial} p + 1)}.$$

Для планового изменения нагрузки наиболее оптимальным является отработка внешнего возмущения при $T_{3\partial} = t_{3\partial} = \tau_y$.

2. Структурно-параметрическая оптимизация САР на базе моделей объекта и заданной оптимальной передаточной функции замкнутой САР по задающему воздействию

Метод заключается в модернизации типовой САР с Д с целью улучшения качества регулирования по сравнению с типовой САР, а также уменьшения числа настраиваемых параметров с учетом выбора оптимального регулятора.

Записываем передаточную функцию оптимального регулятора на основе общей формулы МПК.

$$W_p(p) = \frac{W_{3\partial 1}^0(p)}{W_{\text{ин}}^0(p)} \cdot \frac{1}{1 - W_{3\partial 1}^{\text{opt}}(p)}, \quad (9)$$

$$W_{3\partial 1}^0(p) = \frac{1}{T_{3\partial 1} p + 1}, \quad (10)$$

$$W_{\text{ин}}^0(p) = \frac{k_{\text{ин}}}{T_{\kappa} p + 1}, \quad (11)$$

$$W_p(p) = \frac{T_{\kappa} p + 1}{k_{\text{ин}} \cdot (T_{3\partial 1} p + 1)} \cdot \frac{1}{1 - W_{3\partial 1}^{\text{opt}}(p)}. \quad (12)$$

В САР с Д при достаточно большом значении $K_p \cdot K_{06} \rightarrow \infty$, Д превращается в виртуальный регулятор:

$$W_D(p) = \frac{1}{W_p^6(p)} = \frac{k_{ин} \cdot (T_{з\partial 1} p + 1)}{T_{\kappa} p + 1} \cdot (1 - W_{з\partial 1}^{opt}(p)), \quad (13)$$

$$W_{з\partial 1}^{opt}(p) = \frac{e^{-\tau_y p}}{T_{з\partial 1} p + 1}, \quad (14)$$

$$W_D(p) = \frac{1}{W_p^6(p)} = \frac{k_{ин} \cdot (T_{з\partial 1} p + 1)}{T_{\kappa} p + 1} - \frac{k_{ин} \cdot (T_{з\partial 1} p + 1) \cdot e^{-\tau_y p}}{(T_{\kappa} p + 1)(T_{з\partial 1} p + 1)} =$$

$$= W_{н.м.}(p) - W_{п.м.}(p) \quad (15)$$

Для этого метода наиболее оптимальным является отработка внешнего возмущения при $T_{з\partial 1} = 0,146 \cdot \tau_y$.

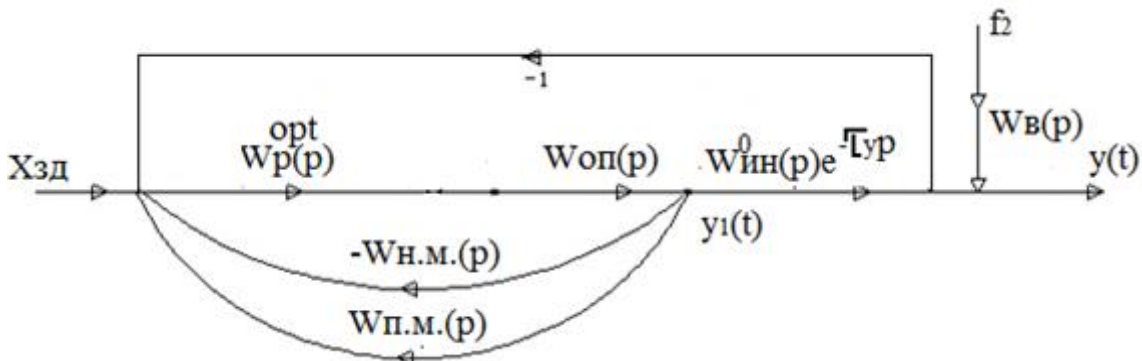


Рисунок 2. Структурная схема САР с Д на базе моделей объекта и заданной оптимальной передаточной функции замкнутой САР по задающему воздействию

$$W_{об}^{экг}(p) = \frac{k_{он} \cdot k_{ин} \cdot (T_{з\partial 1} p + 1)}{(T_{он} p + 1)(\sigma_{он} p + 1)(T_{\kappa} p + 1)}, \quad (16)$$

$$W_p^0(p) = \frac{k_p (T_u p + 1)(T_\partial p + 1)}{T_u p (T_{з\partial 1} p + 1)}. \quad (17)$$

В качестве критерия оптимальности примем \min время отработки скачка задания с полной компенсацией постоянной времени объекта.

$$T_u = T_{\kappa}, \quad (18)$$

$$T_\partial = T_{он}, \quad (19)$$

$$k_p = \frac{T_{\kappa}}{k_{он} \cdot k_{ин} \cdot T_{см}}, \quad (20)$$

$$W_p^{opt}(p) = \frac{(T_{\kappa} p + 1)(T_{он} p + 1) \cdot T_{\kappa}}{k_{он} \cdot k_{ин} (T_{з\partial 1} p + 1) \cdot T_{\kappa} \cdot T_{см} p} = \frac{(T_{\kappa} p + 1)(T_{он} p + 1)}{k_{он} \cdot k_{ин} (T_{з\partial 1} p + 1) \cdot T_{см} p}. \quad (21)$$

При взаимной работе двух последовательных впрысков первую САР настраиваем по методу оптимизация САР на базе моделей объекта и заданной оптимальной передаточной функции, замкнутой САР по задающему воздействию, где $T_{з\partial 1} = 0,146 \tau_y$. Один контур второй САР настроен по МПК в ЧВ на отработку крайнего внешнего возмущения и скачка задания, а другой на отработку внутреннего возмущения по МЧК. Выход первой САР подключен ко второй после основного регулятора. Во второй САР используем плановое изменение нагрузки, при $T_{зд} = t_{зд} = \tau_y$.

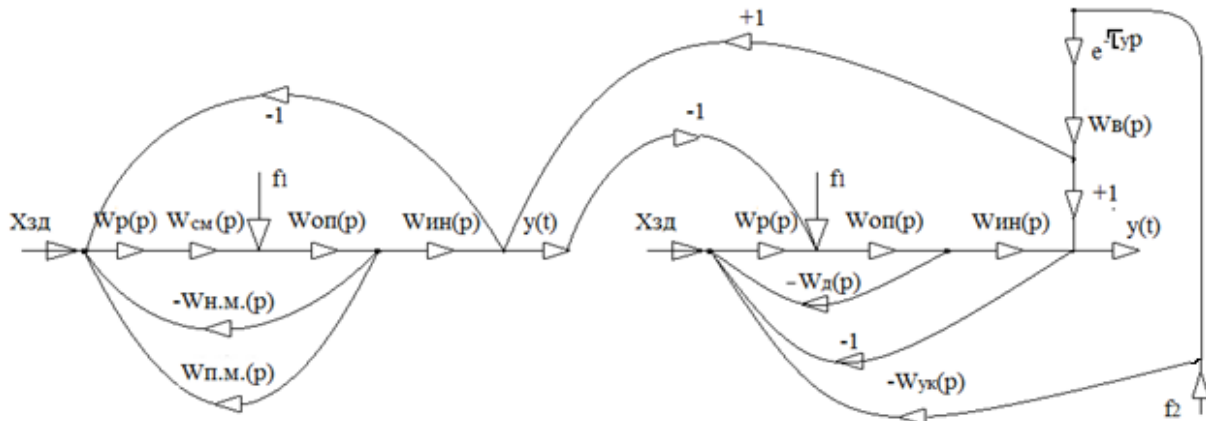


Рисунок 3. Структурная схема САР двух последовательных впрысков

При моделировании переходных процессов использовался программный пакет VisSim. Зная передаточную функцию объекта регулирования, можно экспериментировать с настройками САР на компьютерной модели объекта, что намного дешевле и безопасней, нежели эксперименты с реальным котлоагрегатом.

В VisSim'е используются системы, аналогичные структурным схемам САР

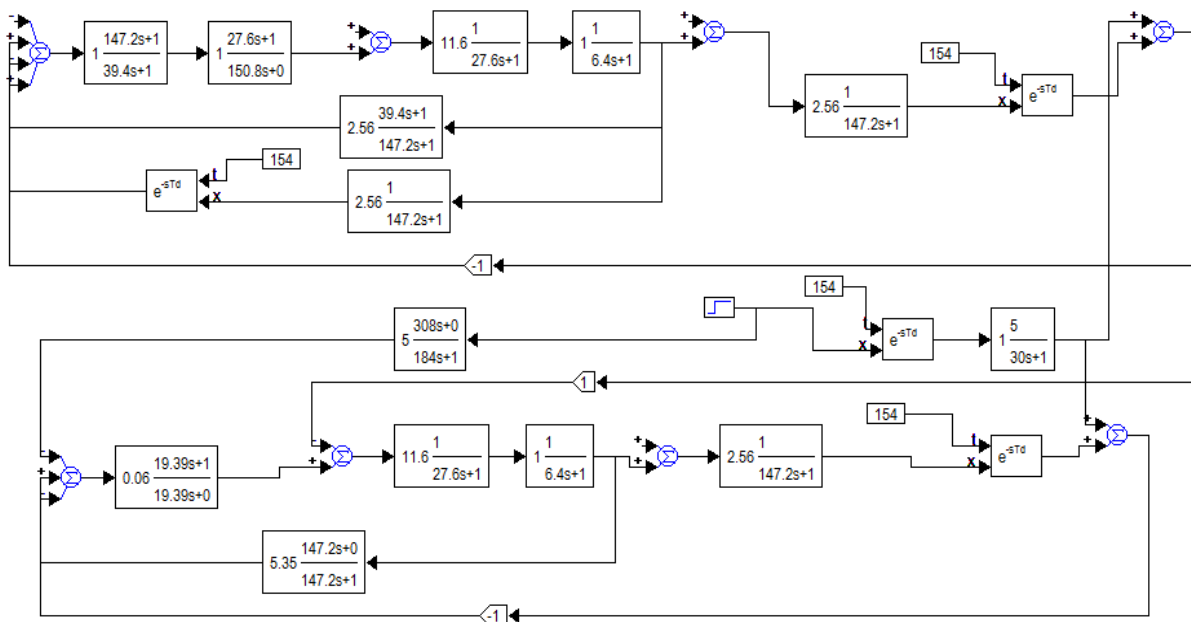


Рисунок 4. Моделирование переходных процессов в VisSim'е. САР двух последовательных впрысков

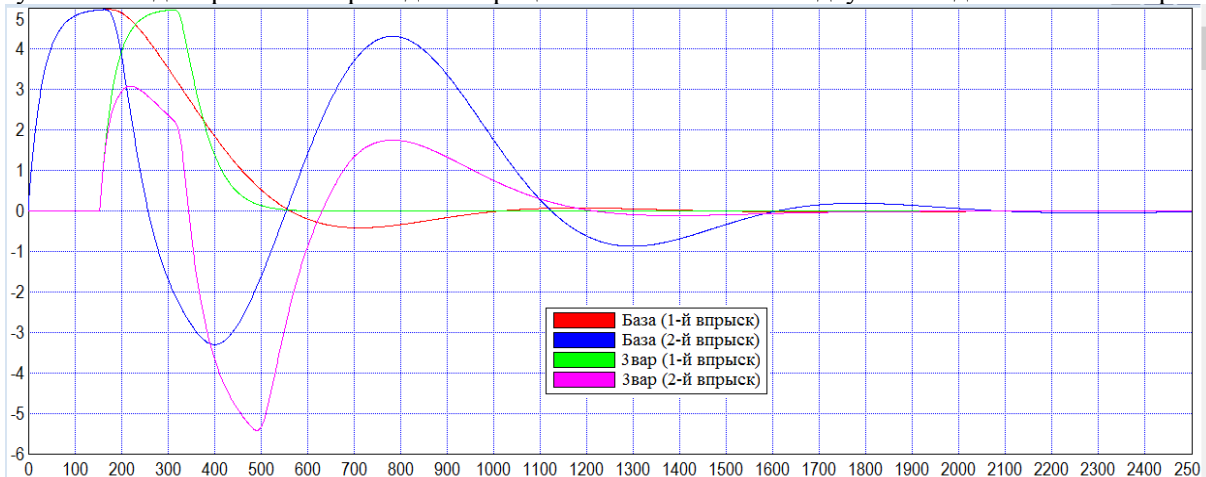


Рисунок 5. Графики отработки САР двух последовательных впрысков внешнего возмущения

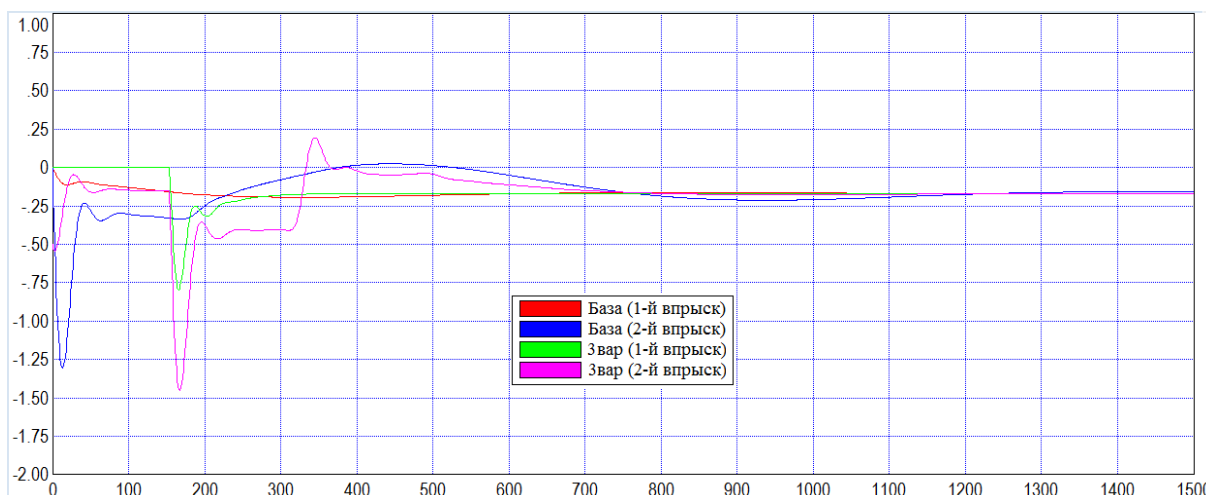


Рисунок 6. Графики отработки САР двух последовательных впрысков регулирующего воздействия

Прямые показатели качества регулирования базовой САР с Д и САР двух последовательных впрысков представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Прямые показатели качества регулирования при отработке внешнего возмущения

Тип настройки	Полное время регулирования t_p , с	Первое время регулирования t_{max} , с	Число колебаний, n	Степень затухания, ψ	Максимальная динамическая ошибка регулирования	Максимальное регулирующее воздействие
База (1-й впрыск)	1430	560	2	0,99	4,96	-0,20
База (2-й впрыск)	2217	258	3	0,94	4,96	-1,3
Предлагаемая САР (1-й впрыск)	502	502	1	1	4,95	-0,8
Предлагаемая САР (2-й впрыск)	1373	395	2	0,97	3,08	-1,45

Вывод: Предлагаемый вариант настройки позволяет существенно улучшить качество регулирования: полное время регулирования первого впрыска уменьшилось в 2,8 раза, второго впрыска – в 1,6 раза; количество колебаний каждой САР при внешнем возмущении сократилось; максимальная динамическая ошибка регулирования при этом уменьшилась в 1,6 раза, а максимальное регулирующее воздействие почти не изменилось. В совокупности существенно удалось улучшить качество регулирования по всем показателям. Такой результат позволяет более точно регулировать температуру пара на выходе из котла и одновременно защитить металл предвключенных ступеней пароперегревателя. Данная АСР позволяет снизить расход собственного конденсата на впрыск. Тем самым уменьшается загрязнение пара охлаждающей водой, что увеличивает срок службы трубок парового коллектора и лопаточного аппарата турбины. Это увеличивает временной интервал между ремонтами, что позволяет экономить значительные денежные средства.

Литература

1. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебное пособие под общей редакцией д.т.н., проф. Кулаков Г.Т. / Г.Т. Кулаков, А.Т. Кулаков, В.В. Кравченко, А.Н. Кухоренко, К.И. Артёменко, Ю.М. Ковриго, И.М. Голинко, Т.Г. Баган, А.С. Бунке. – Минск: Выш. шк., 2017. – 240 с.: ил.
2. Плетнев, Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: Учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с.