

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТИПОВЫХ И  
МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ВПРЫСКОВ КОТЛА  
ТГМП–114 ЭНЕРГОБЛОКА №2 ЛУКОМЛЬСКОЙ ГРЭС**

**Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Воюш Н.В., Артёменко К.И.**

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Введение в эксплуатацию второго энергоблока Белорусской АЭС мощностью 1200 МВт приведет к тому, что энергоблоки ТЭС должны будут работать в широком диапазоне изменения нагрузок, что приведет к снижению надежности и экономичности их работы.

В связи с этим актуальной становится задача повышения надежности и экономичности работы энергоблоков ТЭС в переменных режимах за счет модернизации типовых регуляторов впрысков на базе современных экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического регулирования теплоэнергетических процессов.

Типовая САР температуры перегретого пара парового котла представляет собой двухконтурную систему автоматического регулирования с дифференцированием температуры пара за местом впрыска, далее называемая регулятором впрыска (РВ), сравнивалось на трех уровнях нагрузки котла по показателям качества переходных процессов при основных воздействиях с четырьмя вариантами модернизации РВ: инвариантная система автоматического регулирования на базе САР со стабилизирующим устройством; регулятор впрыска на базе модифицированного линейного упредителя Смита с фильтром в цепи задания; инвариантная система автоматического регулирования на базе каскадной САР с фильтром в цепи задания; инвариантная система автоматического регулирования на базе передаточных функций оптимальных регуляторов с динамической компенсацией и с использованием фильтра в цепи задания.

В результате проведенных исследований были определены аналитические зависимости корректировки оптимальных параметров динамической настройки модернизированных РВ в функции от нагрузки котла.

Результаты моделирования переходных процессов каскадных систем регулирования (КСАР) с реализацией корректирующего регулятора (КР) в виде последовательного и параллельного соединения составляющих ПИД-регулятора показали, что при одинаковом качестве регулирования при отработке внешнего возмущения максимальные значения регулирующего воздействия при параллельной структуре ПИД-регулятора на 39,5 % больше, чем при последовательной реализации ПИД-регулятора, что

увеличивает расход электроэнергии на привод регулирующих клапанов впрыска.

Были также разработаны рекомендации для проведения эксплуатационных испытаний модернизированных и типовых РВ при отработке калиброванных трапецеидальных возмущений автоматического задатчика мощности блока САУМБ (АЗМБ САУМБ) для первого и второго впрысков.

Анализ результатов эксплуатационных испытаний модернизированных и типовых РВ позволил установить, что:

1. Использование предложенных БНТУ методов расчета САР с дифференциатором на минимальной нагрузке котла (120 МВт), несмотря на ухудшение динамических характеристик, позволяет повысить качество регулирования в 1,38 раза по сравнению с типовой САР РВ.

2. Использование инвариантной каскадной САР (ИКСАР) с дифференциатором инвариантности по температуре пара до места впрыска позволяет уменьшить максимальное отклонение температуры на выходе котла при отработке трапецеидального внешнего возмущения АЗМБ САУМБ в 1,42 раза.

3. Замена ТСАР ЛГРЭС (САР с дифференциатором) на КСАР БНТУ позволяет уменьшить средние отклонения температуры пара за котлом А1 в 1,5 раза.

4. Использование ТСАР ЛГРЭС с дифференциатором инвариантности по наиболее опасному внутреннему дополнительно измеряемому возмущению позволяет уменьшить максимальное отклонение температуры на выходе котла в 1,73 раза.

5. Внедрение ИКСАР с моделью и дифференциатором инвариантности по температуре пара до места впрыска позволяет повысить качество регулирования температуры пара за котлом в 1,94 раза.

6. Максимальные отклонения температуры перегретого пара приходится на окончание набора или снижения выхода АЗМБ САУМБ. При этом фактическая активная мощность генератора при наборе нагрузки значительно отстает от заданного АЗМБ значения, а при снижении нагрузки ошибка регулирования по активной мощности генератора существенно меньше. Это подтверждает актуальность модернизации как структуры, так и параметров динамической настройки САУМБ с заменой котельного регулятора мощности на ПИД-регулятор или оптимальный регулятор с динамической компенсацией.

На рисунке 1 представлена, в качестве примера, структурная схема моделирования переходных процессов инвариантной САР с использованием модифицированного линейного упредителя Смита (ИСАР) с полной инвариантностью относительно внутренних возмущений и выделением эквивалентного внешнего возмущения без его непосредственного измерения (схема а)), типовой САР с дифференциатором при штатных параметрах динамической настройки

(схема в)), а также схема формирователя трапецеидального внешнего возмущения (схема с)) изменения электрической мощности энергоблока с помощью автоматического задатчика мощности блока №2 Лукомльской ГРЭС со скоростью набора (сброса) мощности 5 МВт/мин [1].

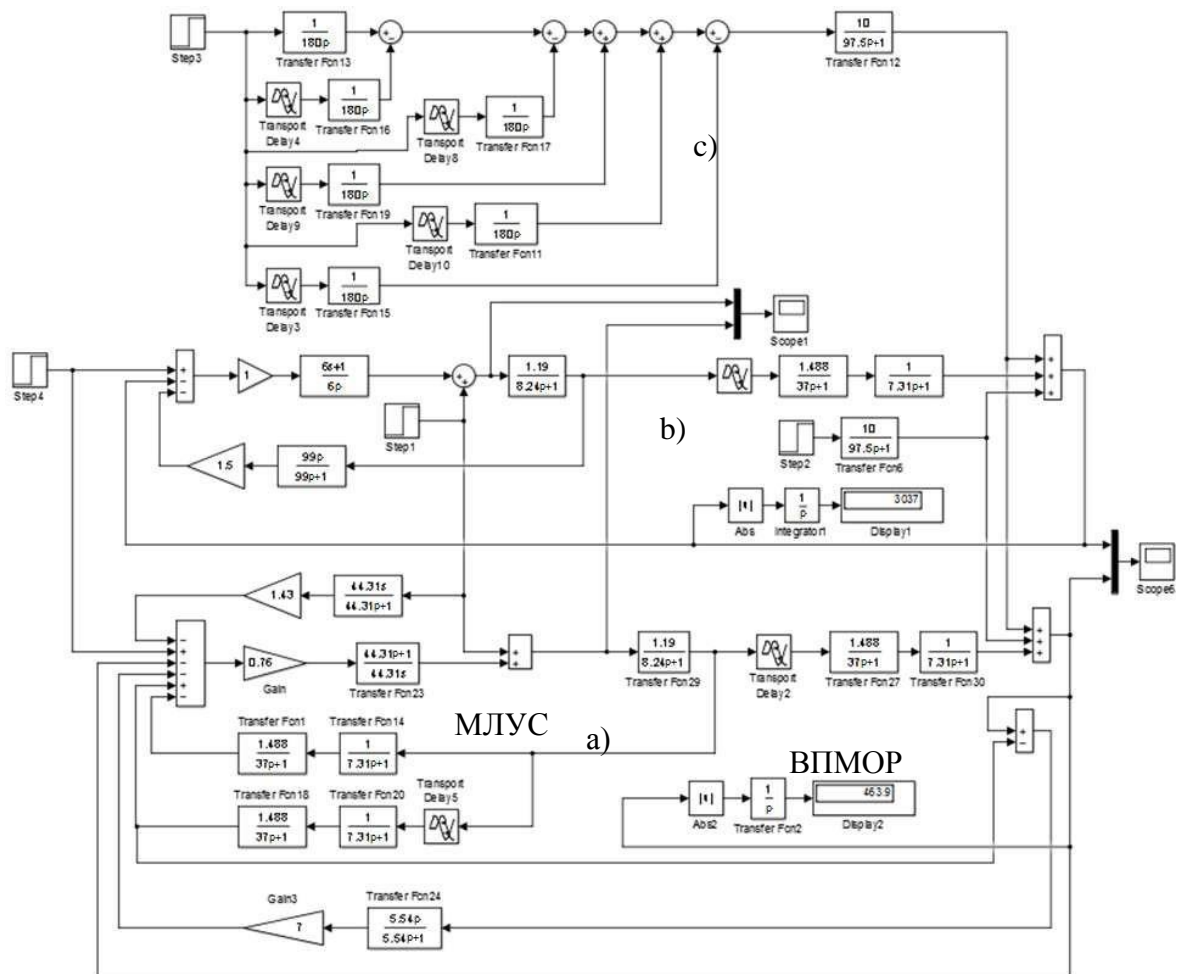


Рисунок 1. Схема моделирования инвариантной и типовой систем автоматического регулирования температуры перегретого пара парового котла в пакете Simulink

Из анализа графиков переходных процессов следует, что при обработке скачка задающего воздействия, время регулирования в инвариантной САР уменьшается в три раза по сравнению с типовой САР (рисунок 2, а). В обеих системах переходные процессы при обработке скачка задающего воздействия являются монотонными, однако переходной процесс в типовой САР в момент времени  $t = 100c$  изменяется в обратную сторону, что уменьшает приемистость при обработке скачка задания (рисунок 2, а). Это обусловлено большим изменением регулирующего воздействия по сравнению с типовой САР (рисунок 2, б). При этом адекватность исходных математических моделей объекта регулирования подтверждена результатами сравнения эксплуатационных испытаний

типовой САР при обработке скачка задания и результатами моделирования переходных процессов. Видно, что график переходного процесса при обработке скачка задающего воздействия во время эксплуатационных испытаний (процесс с точками) практически совпадает с результатами моделирования (рисунок 2, а – темная линия).

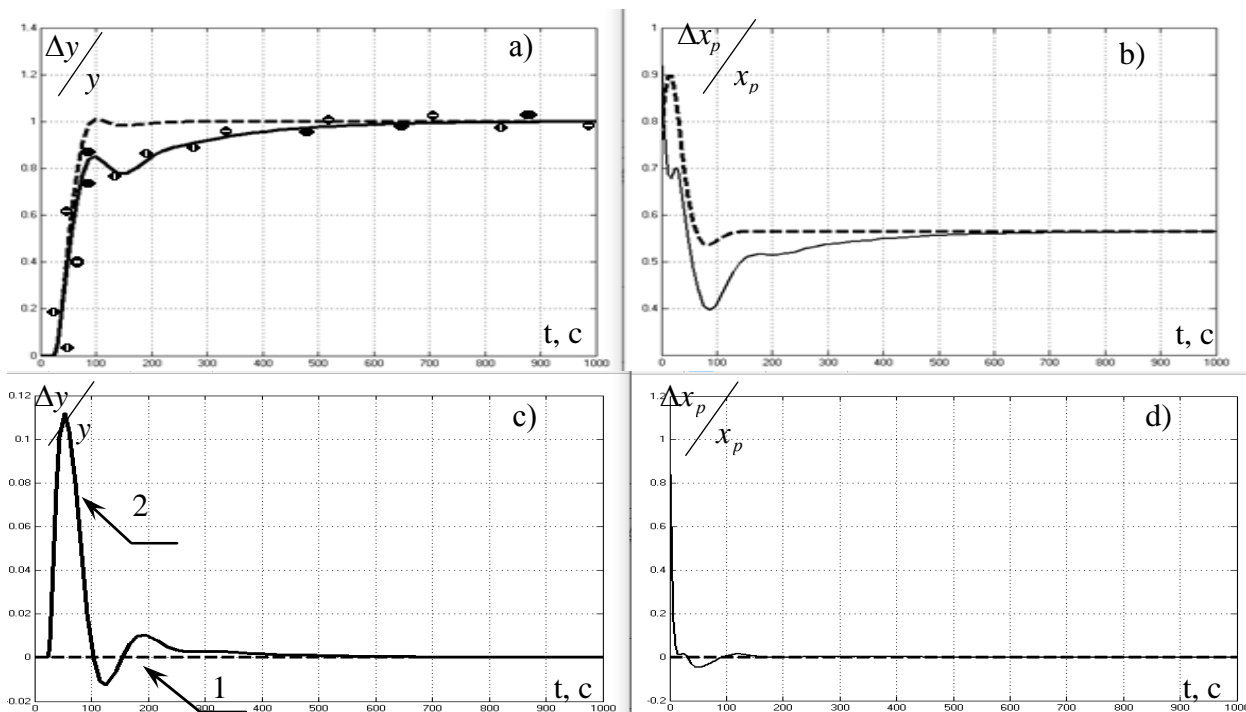


Рисунок 2. Переходные процессы в типовой и модернизированной САР при обработке скачка задания и внутренних возмущений

При обработке скачка наиболее опасного измеряемого внутреннего возмущения достигнута полная инвариантность (рисунок 2, с – прямая 1) за счет использования первого дифференциатора. При отключении дифференциатора инвариантности наиболее опасного внутреннего возмущения максимальная динамическая ошибка регулирования типовой САР составляет 11% от скачка возмущения (рисунок 2, с – кривая 2).

Переходные процессы в ИСАР и типовой САР при обработке скачкообразного и трапецеидального изменения внешнего возмущения приведены на рисунок 3.

Видно, что максимальная динамическая ошибка регулирования при обработке скачка внешнего возмущения в ИСАР уменьшилась по сравнению с типовой САР на 30%, время регулирования сократилось в 2,3 раза, а площадь модуля ошибки регулирования уменьшилась в 5,6 раза (рисунок 3, а). Это достигнуто за счет большей скорости изменения регулирующего воздействия (рисунок 3, б).

При обработке трапецеидального внешнего возмущения максимальная динамическая ошибка регулирования ИСАР уменьшилась по сравнению с

типовой САР в 3 раза, время регулирования сократилось в 2 раза, а площадь модуля ошибки регулирования – в 5,5 раза (рисунок 3, с).

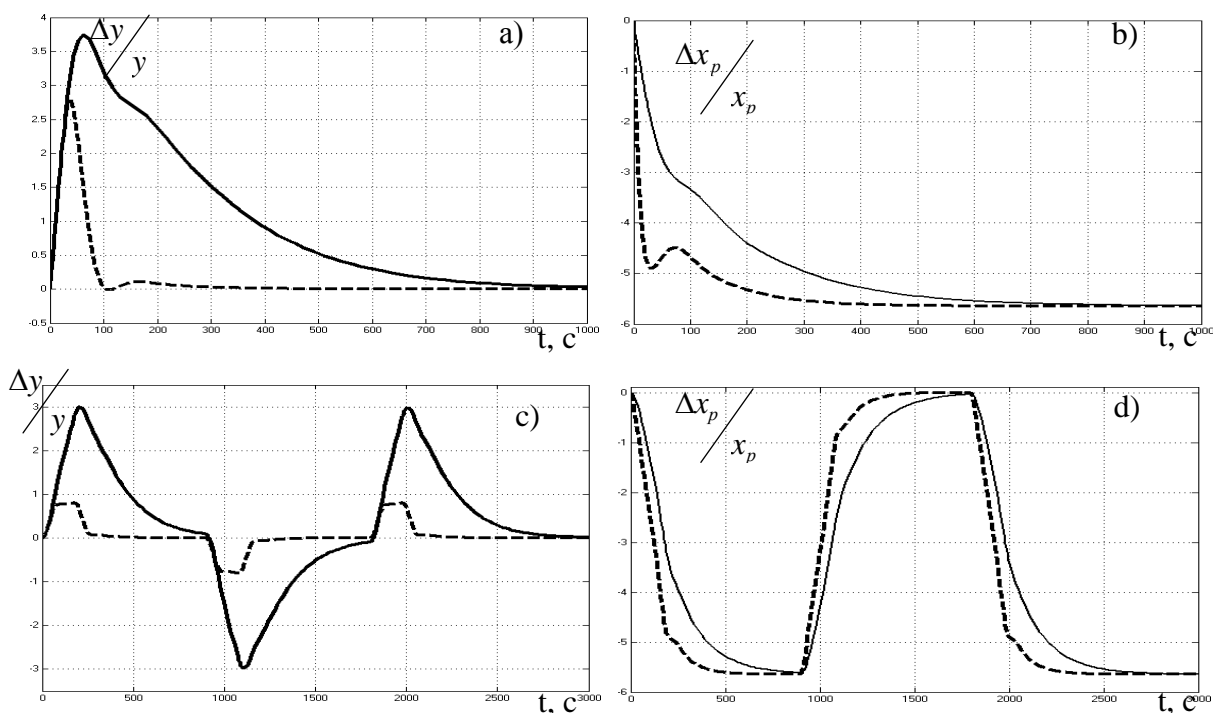


Рисунок 3. Графики переходных процессов типовой и инвариантной САР при обработке скачка крайнего внешнего возмущения (а, б) и трапецидального возмущения (с, д)

Таким образом ИСАР по сравнению с типовой САР позволяет существенно повысить быстродействие и точность поддержания регулируемого параметра и может быть рекомендована для широкого внедрения на котлах ТЭС ГПО «Белэнерго».

1. Теория автоматического управления: учебное пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2022. – 197 с.