



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-97-102>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.52

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИСПОСОБЛЯЮЩИХСЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Г.Т. КУЛАКОВ, А.Т. КУЛАКОВ

*Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 28 июня 2021*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

**Аннотация.** Освещаются вопросы существенного улучшения качества управления объектами с самовыравниванием с использованием двухконтурных систем автоматического управления (САУ). Приведены результаты моделирования и промышленных испытаний типовой системы автоматического управления и предлагаемой инвариантной каскадной САУ. Обоснованы преимущества методов структурно-параметрической оптимизации для создания высококачественных систем управления теплоэнергетическими процессами. Предложен следующий алгоритм формирования структурной схемы высококачественной инвариантной каскадной САУ. Вначале определяют структуру оптимальной передаточной функции стабилизирующего регулятора как произведения обратной передаточной функции опережающего участка объекта на заданную передаточную функцию разомкнутой системы внутреннего контура в виде идеального интегрирующего звена с одним расчетным параметром динамической настройки, позволяющим оптимально обрабатывать как внутренние возмущения, так и задание стабилизирующему регулятору. Затем рассчитывают параметры динамической настройки корректирующего регулятора на оптимальную обработку крайнего внешнего возмущения. Далее выделяют эквивалентное внешнее возмущение без его непосредственного измерения с использованием полной модели инерционного участка объекта. При этом полученную разность основной регулируемой величины и выхода модели подают на вход устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения, реализованного в виде дифференциатора, что позволяет повысить точность и быстродействие инвариантной САУ по сравнению с типовой. Для обеспечения высокого качества регулирования во всем диапазоне изменения нагрузок параметры динамической настройки инвариантной каскадной САУ и модели инерционного участка корректируют в функции нагрузки.

**Ключевые слова:** системы управления, высокое качество, инвариантность, модели объекта и систем, структурно-параметрическая оптимизация, переменная динамика.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т. Основные принципы построения высококачественных аналитических приспособляющихся систем управления теплоэнергетическими процессами. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 97-102.

## BASIC PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF HIGH-QUALITY ANALYTICAL ADAPTABLE CONTROL SYSTEMS FOR THERMAL ENERGY PROCESSES

GENADZI T. KULAKOU, ALIAKSANDR T. KULAKOU

*Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 28 June 2021*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

**Abstract.** The modeling results and industrial tests of a typical automatic control system (ACS) and the proposed invariant cascade ACS are presented. The advantages of structural-parametric optimization methods for creating high-quality control systems for heat-and-power processes have been substantiated. The following algorithm for forming a block diagram of a high-quality invariant cascade SAR is proposed. At the beginning, the structure of the optimal transfer function of the stabilizing regulator is determined as the product of the inverse transfer function of the leading section of the object by a given transfer function of the open system of the internal circuit in the form of an ideal integrating link with one calculated parameter of dynamic tuning, which allows optimally working out both internal disturbances and the task of the stabilizing regulator. Then, the parameters of the dynamic adjustment of the corrective regulator are calculated for optimal processing of the extreme external disturbance. Next, an equivalent external perturbation is isolated without its direct measurement using a complete model of the inertial section of the object. At the same time, the obtained difference between the main adjustable value and the model output is fed to the input of an equivalent external perturbation compensation device implemented in the form of a differentiator, which makes it possible to increase the accuracy and speed of the invariant SAR compared to the standard one. To ensure high quality control over the entire range of load changes, the parameters of the dynamic adjustment of the invariant SAR and the model of the inertial section are adjusted in the load function.

**Keywords:** control systems, high quality, invariance, object and system models, structural-parametric optimization, variable dynamics.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Kulakou G.T., Kulakou A.T. Basic principles of construction of high-quality analytical adaptable control systems for thermal energy processes. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 97-102.

Основной проблемой внедрения современных систем автоматического управления тепловых электрических станций (ТЭС) и атомных электрических станций (АЭС) является обеспечение высокого качества их функционирования в переменных режимах [1].

В аналитических системах автоматического управления (САУ) контролируемые изменения динамических характеристик теплоэнергетических объектов по каналу управляющих воздействий зависят от уровня нагрузки. Эти изменения можно вычислять заранее и с помощью устройств коррекции параметров динамической настройки системы автоматически их корректировать в функции нагрузки по вычисленным нелинейным зависимостям, сохраняя высокое качество регулирования в рабочем диапазоне изменения нагрузок, т. е. приспосабливать САУ к изменениям динамических характеристик объектов управления [2].

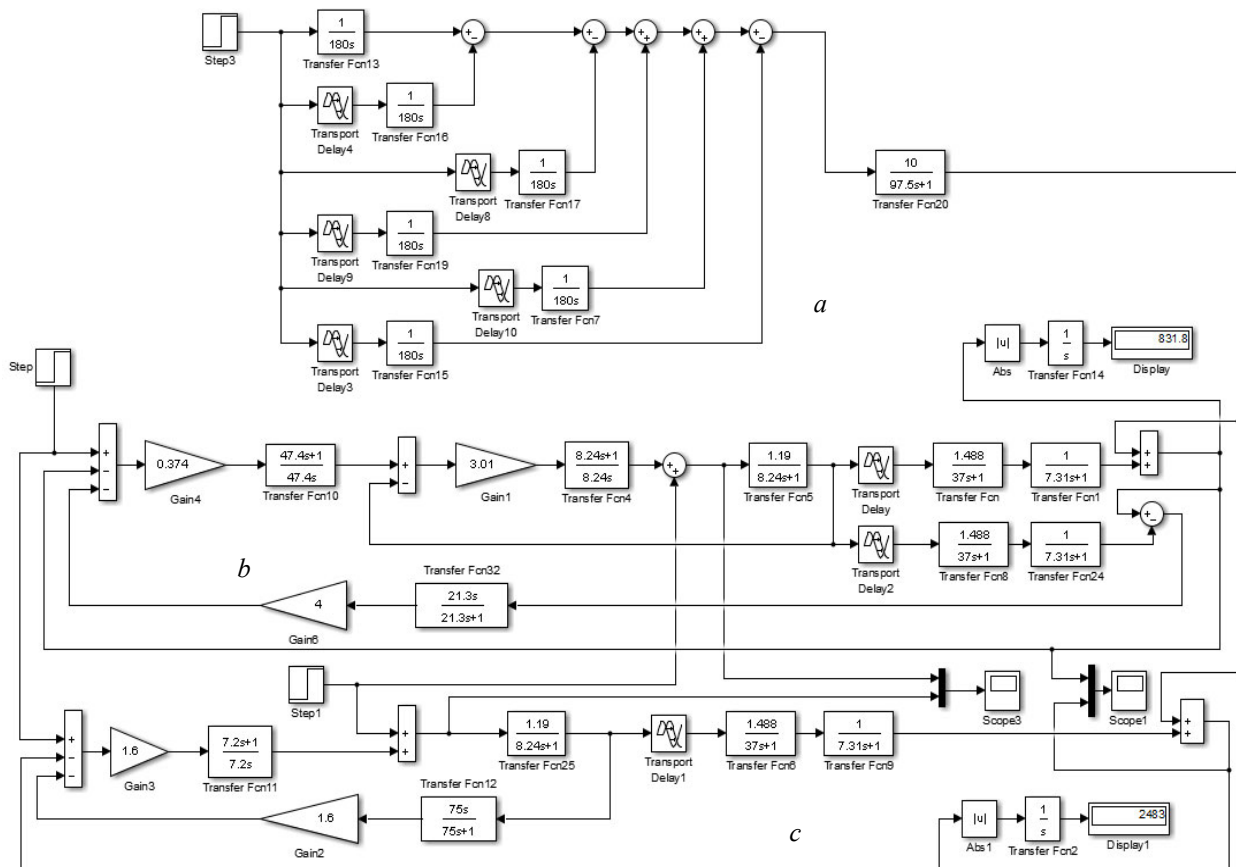
При построении оптимальных и адаптивных систем управления широко применяют как модели объектов, так и системы в целом, например, при обработке скачка задания [3].

В работах [4–6] для построения высококачественных структур САУ используется обратная передаточная функция модели объекта, реализованная в структуре оптимальных регуляторов, и модель замкнутой системы в качестве критерия оптимальной обработки задания. При этом структура и параметры модели системы должны полностью соответствовать структуре и параметрам модели объекта. При выполнении этих условий процессы в реальной системе при обработке задания будут не приближаться к модели-эталону, а точно ей следовать. В этих же работах приведены методы структурно-параметрической оптимизации как типовых двухконтурных САУ, так и инвариантных по отношению как к наиболее опасным внутренним,

так и внешним возмущениям. В работах [7–9] приведены различные варианты структурных схем инвариантных САУ, в том числе с использованием передаточных функций оптимальных регуляторов как для объектов с самовыравниванием, так и для объектов без самовыравнивания.

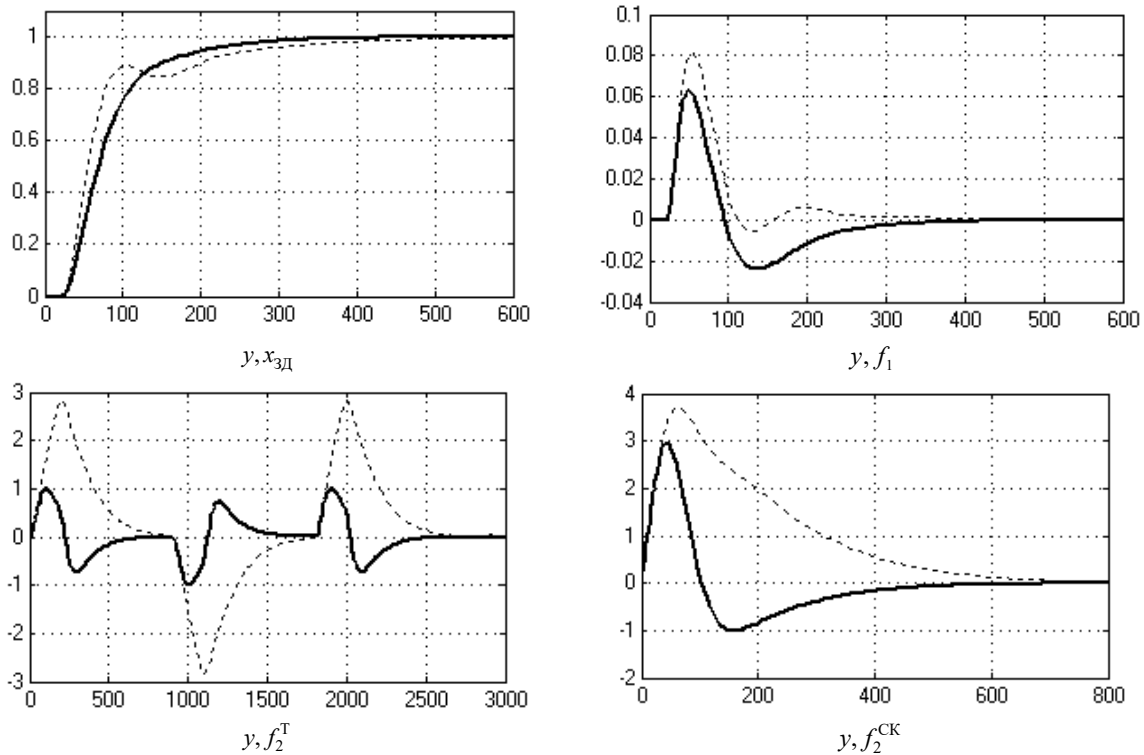
Для построения инвариантных САУ по отношению к внешним неизмеряемым возмущающим воздействиям используются полные модели инерционных или главных участков объекта управления, которые формируют параллельно реальным участкам, а разницу между текущими значениями выхода системы и полной модели объекта используют для коррекции задания основному или корректирующему регулятору с помощью устройства выделения внешнего возмущения, реализуя систему управления с нулевой чувствительностью к изменениям динамических характеристик объекта [3].

На рис. 1 приведены схемы моделирования переходных процессов формирования трапецеидальных возмущающих воздействий с выхода автоматического задатчика электрической мощности энергоблока (рис. 1, а), предлагаемой инвариантной системы автоматического управления (рис. 1, б) и типовой двухконтурной САУ с дифференциатором первого впрыска котла ТГМП-114 Лукомльской ГРЭС (ЛГРЭС) (рис. 1, с). При этом структура и настройка стабилизирующего регулятора выбиралась с использованием передаточной функции оптимального регулятора [9], а корректирующего регулятора – по методу полной компенсации большей постоянной времени объекта [4]. Модель инерционного участка представлена инерционным звеном второго порядка с запаздыванием, а устройство компенсации внешнего возмущения реализовано в виде дифференциатора, настройки которого рассчитывают с учетом заданной модели отработки задания корректирующим регулятором [1].



**Рис. 1.** Структурные схемы моделирования переходных процессов: формирователя трапецеидальных внешних возмущений (а); инвариантной САУ (б); типовой САУ с дифференциатором Лукомльской ГРЭС (с)  
**Fig. 1.** Functional block diagrams for modeling transient processes: generator of trapezoidal external disturbances (a); invariant ACS (b); typical ACS with differentiator of Lukoml state district power station (c)

На рис. 2 приведены графики переходных процессов САУ при обработке скачка задания  $y, x_{3д}$  корректирующему регулятору, внутренних возмущений  $y, f_1$ , внешних трапецеидальных возмущений  $y, f_2^T$ , а также скачкообразных внешних возмущений  $y, f_2^{СК}$ . При этом пунктирные линии соответствуют типовой САУ с дифференциатором, а жирные – инвариантной САУ.



**Рис. 2.** Графики переходных процессов в типовой САУ ЛГРЭС и инвариантной каскадной САУ при отработке: скачка задания  $y, x_{3д}$ ; внутреннего возмущения  $y, f_1$ ; внешнего трапецеидального возмущения  $y, f_2^T$ ; внешнего скачкообразного возмущения  $y, f_2^{СК}$

**Fig. 2.** Graphs of transient processes in a common automatic control system of Lukoml power station and an invariant cascade automatic control system during work: Desired and Actual response (InPut/OutPut)  $y, x_{3д}$ ; internal disturbance  $y, f_1$ ; external trapezoidal disturbance  $y, f_2$ ; external step disturbance  $y, f_2$

Из графиков переходных процессов (рис. 2) следует, что время отработки задания инвариантной САУ по сравнению со штатной САУ ЛГРЭС уменьшилось в 1,5 раза, а графики переходных процессов по результатам моделирования и эксплуатационных испытаний практически совпадают.

Максимальная динамическая ошибка при отработке внутренних возмущений  $y, f_1$  инвариантной САУ уменьшилась в 1,3 раза по сравнению со штатной САУ ЛГРЭС. При этом интегральная оценка по модулю ошибки регулируемой величины уменьшилась на 12 %.

При отработке трапецеидальных внешних возмущений  $y, f_2^T$  максимальная динамическая ошибка регулирования и интегральная оценка по модулю ошибки регулирования уменьшилась в 3 раза по сравнению с типовой САУ ЛГРЭС. При отработке скачка внешнего возмущения интегральная оценка по модулю уменьшилась по сравнению типовой САУ в 2,3 раза, а максимальная динамическая ошибка регулирования уменьшилась на 20 %.

По результатам промышленных испытаний и моделирования было установлено, что время регулирования инвариантной каскадной САУ, а также дисперсия ошибки регулирования в 2 раза меньше, чем у типовой САУ. Это позволяет рекомендовать инвариантные каскадные системы автоматического управления для широкого внедрения на тепловых электрических станциях ГПО «Белэнерго».

### Список литературы

1. Кулаков Г.Т. Структурно-параметрическая оптимизация динамических систем теплоэнергетических *Vyshejschaya shkola* процессов ТЭС и АЭС. *Доклады БГУИР*. 2015;2(88):144-147.
2. Хутский Г.И., Кулаков Г.Т. Системы автоматического регулирования температуры перегретого пара с устройством коррекции параметров динамической настройки. *Теплоэнергетика*. 1968;3:37-41.
3. Александровский Н.М., Егоров С.В., Кузин Р.Е. *Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами*. Москва: Энергия; 1973.
4. Кулаков Г.Т. *Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: справочное пособие*. Минск: Вышэйшая школа; 1984.
5. Кулаков Г.Т. *Анализ и синтез систем автоматического регулирования*. Минск: Технопринт; 2003.
6. Кузьмицкий И.Ф., Кулаков Г.Т. *Теория автоматического управления: учебное пособие*. Минск: БГТУ; 2006.
7. Кузьмицкий И.Ф., Кулаков Г.Т. *Теория автоматического управления: учебник для вузов*. Минск: БГТУ; 2010.
8. Кулаков Г.Т. *Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебное пособие*. Минск: Вышэйшая школа; 2017.

### References

1. Kulakov G.T. [Structural-parametric optimization of dynamic systems of thermal power processes of thermal power plants and nuclear power plants]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2015;2(88):144-147. (In Russ.)
2. Khutsky G.I., Kulakov G.T. [Systems of automatic temperature control of superheated steam with a device for correcting dynamic adjustment parameters]. *Teploenergetika*. 1968;3:37-41. (In Russ.)
3. Alexandrovsky N.M., Egorov S.V., Kuzin R.E. [Adaptive automatic control systems for complex technological processes]. Moscow: Energia; 1973. (In Russ.)
4. Kulakov G.T. [*Inzhenernye ekspress-metody rascheta promyshlennyh sistem regulirovaniya: spravochnoe posobie*]. Minsk: Vyshejschaya shkola; 1984. (In Russ.)
5. Kulakov G.T. [*Analysis and synthesis of automatic control systems*]. Minsk: Technoprint; 2003.
6. Kuzmitsky I.F., Kulakov G.T. [*Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie*]. Minsk: BSTU; 2006. (In Russ.)
7. Kuzmitsky I.F., Kulakov G.T. [*Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik dlya vuzov*]. Minsk: BSTU; 2010. (In Russ.)
8. Kulakov G.T. [*Teoriya avtomaticheskogo upravleniya teploenergeticheskimi processami: uchebnoe posobie*]. Minsk: Vyshejschaya shkola; 2017. (In Russ.)

### Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи. / All authors have equally contributed to writing the article.

#### Сведения об авторах

Кулаков Г.Т., д.т.н., профессор, профессор Белорусского национального технического университета.

Кулаков А.Т., к.т.н., доцент, доцент Белорусского национального технического университета.

#### Information about the authors

Kulakov G.T., D.Sc, Professor, Professor of Belarusian National Technical University.

Kulakov A.T., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Belarusian National Technical University.

#### Address for correspondence

Адрес для корреспонденции  
220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр-т Независимости, 65,  
Белорусский национальный технический университет;  
тел. 8-017-293-91-45; +375-29-693-70-27;  
Кулаков Геннадий Тихонович

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti Ave., 65,  
Belarusian National Technical  
University;  
tel. 8-017-293-91-45; +375-29-693-70-27;  
Kulakov Genadzi Tikhonovich