

10. Tarasov, V. O., Herasymov, B. M., Levin, I. O., Kornijchuk, V. O. (2007). *Intelektual"ni systemy pidtrymky pryjnyattya rishen": Teoriya, syntezy, efektyvnist*". Kyiv: MAKNS, 336.

11. Tarakanov, V. E. (1985). *Kombinatornye zadachi i (0,1) matricy*. Moscow: Nauka, 191.

12. Nauman, K.; Adler, Ju. P. (Ed.) (1987). *Prinjat' reshenie – no kak?* Moscow: Mir, 198.

13. Artemenko, O. V. (2010). *Postroenie matematicheskoy modeli processa prinjatija reshenija na vyet komandirov vozdušnogo sudna. Tehnika v sil'skogospodars'komu virobnictvi, galuzeve mashinobuduvannja, avtomatizacija*, 23, 115–122.

14. Xarchenko, V. P., Shmel"ova, T. F., Sikirda, Yu. V. (2011). *Hrafoanalitichni modeli pryjnyattya rishen" lyudyno-operatorskomu upravlinnyu aviacijnogo universytetu*, 1, 5–17.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Осадчий С. І.
Дата надходження рукопису 21.12.2015*

Артеменко Ольга Васильевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра информационных технологий, Кировоградская летная академия Национального авиационного университета, ул. Добровольского, 1, г. Кировоград, Украина, 25005
E-mail: o_artemenko@list.ru

Артеменко Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра сельскохозяйственного машиностроения, Кировоградский национальный технический университет, пр. Университетский, 8, г. Кировоград, Украина, 25006
E-mail: adu2006@inbox.ru

УДК 62-503.57

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.58815

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИНЕРЦИОННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

© Ю. М. Ковриго, А. С. Бунке, П. В. Новиков

Рассмотрен метод динамической коррекции для достижения необходимого запаса устойчивости систем регулирования инерционными объектами в условиях изменения режима работы технологического оборудования. Предложены структурные решения канала динамической коррекции, приведены методики настройки. Выполнено имитационное моделирование переходных процессов, проведены расчет и сравнение показателей качества регулирования. Применение указанных методик позволяет обеспечить достаточный запас устойчивости при сохранении высокого качества функционирования систем регулирования

Ключевые слова: регулирование, робастность, запас устойчивости, качество функционирования, динамическая коррекция, инерционный объект

The paper considers dynamic correction method to achieve the required safety factor, regulatory inertia objects under changing operational conditions. Structural solutions of correction channel are proposed and their tuning methods are given. Simulation of transients is completed, calculation and comparison of quality control indexes are given. The application of these techniques ensures sufficient stability margin while maintaining the quality of functioning regulatory systems

Keywords: control, robustness, performance quality, stability margin, dynamic correction, inertial object

1. Введение

Достижение высокого качества функционирования многих важнейших контуров регулирования объектов теплоэнергетики является актуальной задачей. Исследования настройки систем автоматического регулирования (САР), вызванные, с одной стороны, новыми возможностями современной контроллерной техники, а с другой – повышенными требованиями к надежности и эффективности, дали поразительные результаты. Количество методик возросло на порядок: если на конец XX в. оно не превышало 200, то в настоящее время, согласно [1], их число достигло 1731 (563 для ПИ- и 1168 для ПИД-алгоритмов). В связи с этим встает вопрос: почему, несмотря на огромные усилия, нет нескольких, до-

статочно универсальных и принятых практикой эффективных методов?

Для простых случаев, когда требования к качеству функционирования невысоки, модель адекватная, ситуация с возмущениями ясная, система работает в режиме стабилизации, проблем с настройкой систем не возникает. Такие условия работы составляют 20–25 % для систем регулирования в промышленности. В то же время по разным оценкам 50–55 % систем регулирования показывают лучшие результаты при ручном управлении, поэтому либо частично работают в автоматическом режиме, либо вообще его не используют (25–30 %) [1, 2]. В действительности проблема имеет комплексный характер и у нее нет простого решения.

Существует большое количество требований к качеству функционирования, многие из которых противоречивы. Это хорошо понятные практикам прямые показатели качества (максимальное динамическое отклонение, время регулирования, характеристики затухания и пр.), однако они недостаточно конструктивны, чтобы их принять за основу методов проектирования. Косвенные показатели (интегральные IAE, ISE, ITSE или частотные M , m), каждый из которых весьма односторонний, удобны для теоретических исследований, широко используются как основа оптимизационных или аналитических методов, но их связь с реальным качеством функционирования довольно искусственна.

Разработчики большинства методик расчетов регуляторов выбирают некоторые “удобные” показатели качества функционирования и, принимая во внимание лишь отдельные свойства реальных объектов управления (ОУ), получают результаты, пригодные для узкого класса задач. Перенос этих методов на другие объекты управления не дает ожидаемых результатов.

2. Постановка задачи и литературный обзор

В последнее время появились интересные решения по робастному проектированию на основе привычных частотных моделей [2], правда, довольно сложных для широкого использования и, главное, ориентированных на косвенные показатели качества функционирования. Распространенная в оптимизационных процедурах норма H_2 удобна для теории, но приводит к излишне колебательному поведению регулируемого параметра. Применение вместо нее нормы H_∞ [3] дает близкое к реальности описание неопределенностей, однако без их структуризации значительно ухудшается качество функционирования.

Кроме того, все большее распространение находит модель объекта в составе систем регулирования – так называемый метод ИМС (Internal Model Control) [4], который, по сути, осуществляет оценку возмущения и неопределенности, а также дает высокое качество функционирования, но его эффективность сильно зависит от точности модели.

Путем объединения нескольких подходов к синтезу систем регулирования можно получить метод проектирования, который эффективен в довольно широком диапазоне неопределенностей, типичных для инерционных ОУ теплоэнергетики, и обеспечивает достаточную робастность за счет небольшого, легко оцениваемого снижения качества функционирования. Также важны простота применения и оценка качества функционирования с помощью прямого, а лучше нескольких прямых показателей качества функционирования.

Для нахождения компромисса между требуемым качеством функционирования и робастностью предложена методика использования динамической коррекции [6]. Рассмотрены различные структуры канала динамической коррекции, а также два варианта настройки динамического корректора: с помощью инженерной методики, а также с использованием точных аналитических формул.

3. Метод динамической коррекции

Контроллерная реализация традиционных алгоритмов управления, введение в структуру дополнительных модулей, таких как ограничители, фильтры, нелинейные элементы, сложные дифференциаторы, защиты от интегрального насыщения, защиты от П- и Д-ударов, значительно расширили возможности структурного синтеза систем управления. Однако, по оценкам экспертов, в промышленной автоматизации доминирующими остаются ПИ- и ПИД-регуляторы (примерно 95 %) [1], при чем большая часть приходится все же на ПИ-регуляторы. В теории ПИД-регулятор имеет значительные преимущества за счет использования дифференциатора, однако на практике существует целый ряд проблем, требующих тех или иных инженерных изысканий, обеспечивающих удовлетворительные условия для адекватной работы Д-составляющей в ПИД-регуляторе. Не всегда решение этих проблем является целесообразным в виду ограниченности временных и финансовых ресурсов, поэтому зачастую в ПИД-регуляторах просто отказываются от Д-составляющей, и они работают как ПИ-регуляторы. К недостаткам ПИД-регуляторов можно отнести:

1. Чувствительность к высокочастотным помехам.

2. Узкий диапазон настройки постоянной времени дифференцирования, которую зачастую выбирают как 10–20 % от постоянной времени интегрирования.

3. Введение дифференциатора снижает запас устойчивости системы управления.

Для обеспечения устойчивости систем регулирования нестационарными технологическими объектами разработан метод динамической коррекции комплексной частотной характеристики (КЧХ) системы [6]. Исходная задача заключается в том, чтобы, подключив определенный набор звеньев (корректор) к стандартному ПИ-регулятору, сместить годограф КЧХ в рабочей частотной области как можно дальше от точки $-1; j0$ (рис. 3). Регулятор с корректором будем называть ПИ-К-регулятором.

Для робастности системы необходимо обеспечить, чтобы показатель запаса устойчивости S_m находился в диапазоне от 1.2 до 2.0, при этом чем меньше S_m , тем больше запас устойчивости и тем система более робастная.

Для увеличения запаса устойчивости и формирования нужного управляющего воздействия используется двухканальная структура: основной канал содержит стандартный ПИ-регулятор, а корректирующий канал – набор передаточных звеньев, обеспечивающих компенсирующий эффект основному каналу на завершающей стадии переходного процесса [7]. Основной канал отвечает за быстроедействие системы, а канал коррекции через установленное время запаздывания (которое зависит от параметров объекта регулирования) компенсирует избыточный сигнал управляющего воздействия, обеспечивая устойчивость САУ на конечном участке переходного процесса, и позволяет использовать форсированные настройки основного канала. Использование звена запаздывания в структуре ПИ-регулятора было пред-

ложено в [8] для улучшения реакции системы на возмущение, но никаких решений по увеличению быстродействия предложено не было. Использование же двух каналов дает дополнительную степень свободы при настройке регулятора и позволяет совместить быстродействие и устойчивость системы.

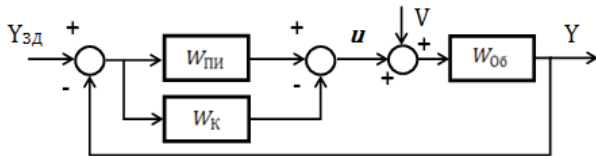


Рис. 1. Структура ПИ-К-регулятора: $Y_{зд}$, Y – заданное и текущее значения регулируемой переменной; V – возмущающее воздействие; u – сигнал управления; $W_{ПИ}$ – передаточная функция ПИ-регулятора, $W_К$ – передаточная функция динамического корректора, $W_{Об}$ – передаточная функция объекта управления

В ходе поиска подходящих структур динамического корректора были исследованы следующие варианты:

1. Аперидическое звено и звено чистой транспортной задержки:

$$W_K^{KT\tau} = K_K \frac{1}{T_K s + 1} e^{-\tau_K s}; \quad (1)$$

2. Пропорциональное звено и звено чистой транспортной задержки:

$$W_K^{K\tau} = K_K e^{-\tau_K s}; \quad (2)$$

3. Два аперидических звена с одинаковыми постоянными времени:

$$W_K^{KT^2} = K_K \frac{1}{(T_K s + 1)^2}; \quad (3)$$

4. Интегрально-дифференцирующее звено и звено чистой транспортной задержки:

$$W_K^{ИД} = K_K \frac{(T_{K1} s + 1)}{(T_{K2} s + 1)} e^{-\tau_K s}; \quad (4)$$

Сравнительные переходные характеристики различных структур динамического корректора приведены на рис. 2.

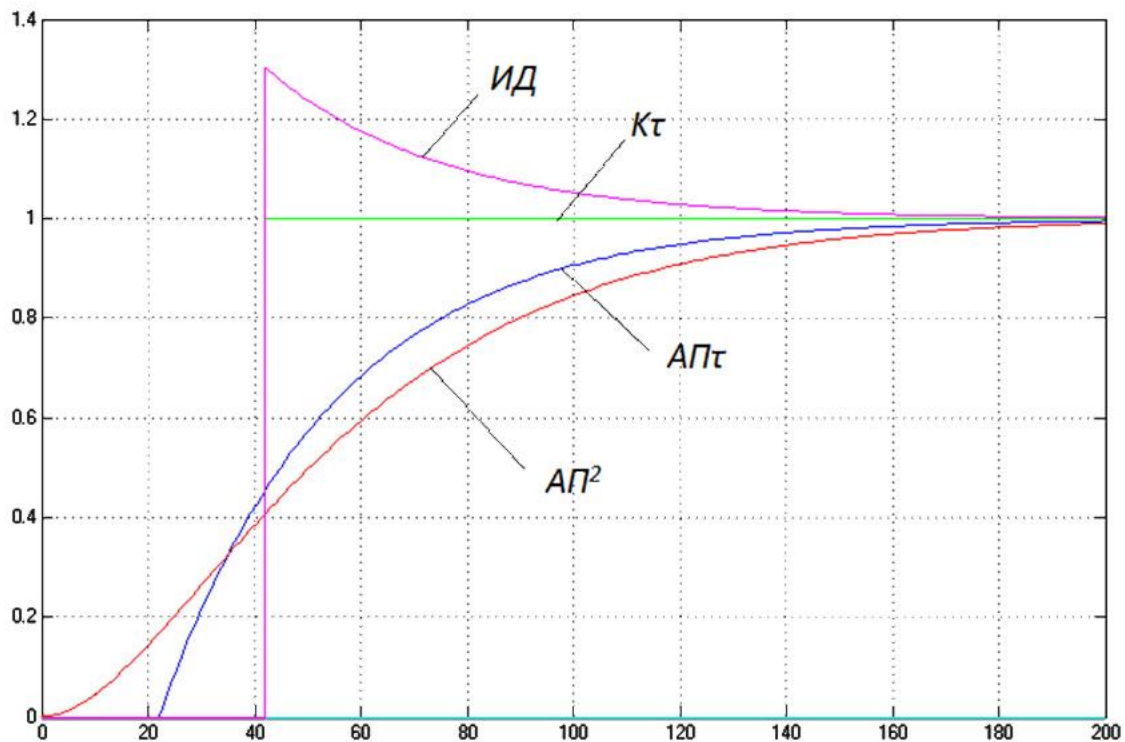


Рис. 2. Сравнительные переходные характеристики различных структур динамического корректора

Как видно из рис. 2, каждая из структур имеет свои особенности и преимущества.

Структура с пропорциональным звеном и звеном задержки является самой простой, и в тоже время быстродействующей. Структуры с аперидическими звеньями характеризуются плавностью, безударностью переходного процесса, что является предпочтительными для позиционеров и современных исполнительных механизмов с аналоговым управлением. Отличие $AП^2$ от $AП\tau$ в том, что в первом случае отсут-

ствует звено транспортной задержки. В этом случае облегчается реализация алгоритма коррекции на контроллерной технике, так как отпадает необходимость в промежуточном буфере, который обеспечивает эффект временной задержки. Корректор с ИД-звеном имеет заброс на начальной стадии, что усиливает тормозящий эффект. В этом случае поведение корректора похоже на то, как работает дифференциатор, однако корректор включается в работу лишь на завершающей стадии переходного процесса.

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет следующий вид:

$$W_{ПИ} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right). \quad (5)$$

Для настройки ПИ-К-регулятора авторами проведены модельные эксперименты, получены зависимости различных показателей качества переходных процессов в замкнутой системе управления от параметров настроек основного и корректирующего каналов, а также выведены аналитические формулы настройки параметров, базирующиеся на исследовании системы с корректором в частотной области.

4. Методика точной настройки параметров

Методика точной аналитической настройки параметров динамического корректора основывается на корректировке АФЧХ разомкнутой системы с корректором.

Рассмотрим разомкнутую систему (РС) согласно рис. 1:

$$W_{PC}(s) = (W_{ПИ}(s) - W_K(s)) \cdot W_{ОБ}(s), \quad (6)$$

где $W_{ПИ}(s)$ – передаточная функция ПИ-регулятора; $W_K(s)$ – передаточная функция корректора; $W_{ОБ}(s)$ – передаточная функция объекта управления.

Запишем (5) в виде:

$$W_{PC}(s) = W_{ПИ}(s) \cdot W_{ОБ}(s) - W_K(s) \cdot W_{ОБ}(s), \quad (7)$$

Исходя из (6) можно утверждать, что АФЧХ разомкнутой системы является векторной суммой АФЧХ произведения $W_{ПИ} \cdot W_{ОБ}$ и АФЧХ произведения $W_K \cdot W_{ОБ}$.

При отсутствии передаточной функции корректора W_K в системе управления (рис. 1) передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид:

$$W_{PC}(s) = W_{ПИ}(s) \cdot W_{ОБ}(s), \quad (8)$$

то есть она равняется первому слагаемому в формуле (7).

Если считать, что $W_{ПИ}$ и $W_{ОБ}$ известны, тогда АФЧХ произведения $W_K \cdot W_{ОБ}$ является корректирующей АФЧХ к АФЧХ разомкнутой системы $W_{ПИ} \cdot W_{ОБ}$.

Влияние корректирующей АФЧХ к АФЧХ разомкнутой системы $W_{ПИ} \cdot W_{ОБ}$ приведено на рис. 3.

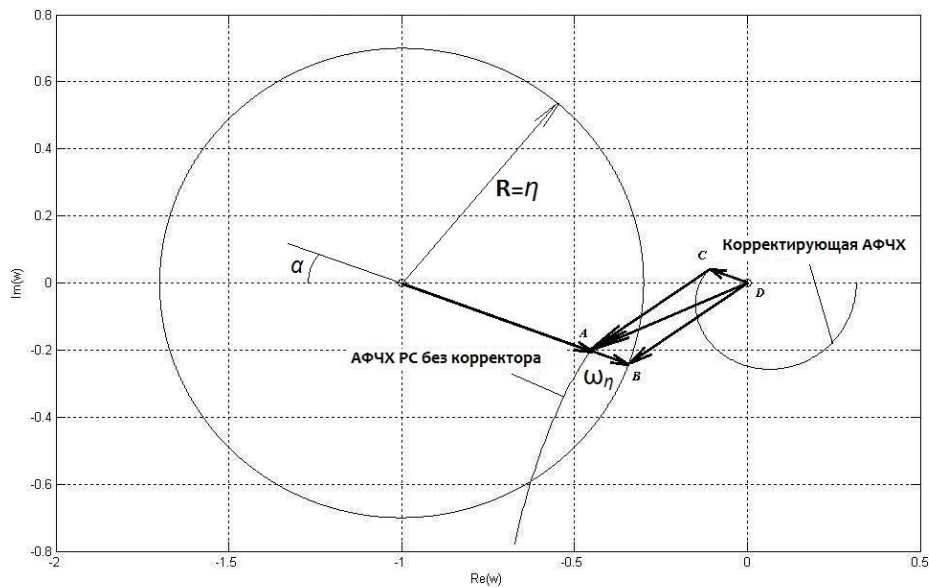


Рис. 3. Влияние динамического корректора на АФЧХ разомкнутой системы

Как видно из рис. 3, корректирующая АФЧХ смещает АФЧХ РС вбок от точки $(-1;j0)$, тем самым увеличивая запас устойчивости системы по усилению и по фазе.

Критерием настройки в предложенном методе настройки корректора выступает радиус круга с центром в точке $(-1;j0)$. По сути это максимум функции чувствительности M_s :

$$M_s = \frac{1}{\eta} = \max_{\omega} S(\omega) = \max_{\omega} \frac{1}{|1 + W_{PC}(j\omega)|}. \quad (9)$$

Если АФЧХ РС попадает в окружность заданного радиуса, то есть приближается к точке $(-1;j0)$ больше, чем мы этого хотим, то необходимо подо-

брать такие настройки корректора, чтобы сдвинуть АФЧХ РС на достаточное расстояние, при этом не изменяя настройки ПИ-регулятора.

На некоторой частоте ω_{η} годограф корректирующей АФЧХ (CD) находится во II-й четверти, а годограф АФЧХ РС (DA) – в III-й. Разница векторов DA и DC есть вектор CA, который в свою очередь является годографом АФЧХ РС с корректором. Параметры корректора T и τ определяют скорость вращения годографа CD, то есть фактически отвечают за своевременное совмещение корректирующей АФЧХ и АФЧХ РС. Параметр корректора K определяет модуль корректирующей АФЧХ.

Аналитические формулы расчета настроек выведены для двух структур динамического корректора:

1. $W_K^{K\tau} = K_K e^{-\tau_k s}$;
2. $W_K^{KT^2} = K_K \frac{1}{(T_K s + 1)^2}$.

Если обозначить

$$W^* = 1 + W_{ПИ} W_{ОБ}, \tag{10}$$

$$\hat{W} = W_{ОБ} \cdot W_K \frac{1}{K_K}, \tag{11}$$

$$\omega = \omega_{пр}, \tag{12}$$

то время задержки τ_K для корректора $W_K^{K\tau}$ будет рассчитываться по следующей формуле:

$$\tau_K = \frac{1}{\omega} \arctg \left(\frac{\text{tg} \alpha \text{Re}_{ОБ}(\omega) + \text{Im}_{ОБ}(\omega)}{\text{Re}_{ОБ}(\omega) - \text{tg} \alpha \text{Im}_{ОБ}(\omega)} \right) + \frac{\pi}{\omega} n, n \in Z. \tag{13}$$

Постоянная времени T_K для корректора $W_K^{KT^2}$ будет рассчитываться по следующей формуле:

$$T_K = \frac{1}{\omega} \frac{\text{Re}_{ОБ}(\omega) - \text{tg} \alpha \text{Im}_{ОБ}(\omega) + A_{ОБ} \frac{1}{\cos \alpha}}{-(\text{tg} \alpha \text{Re}_{ОБ}(\omega) + \text{Im}_{ОБ}(\omega))}. \tag{14}$$

Коэффициент усиления для обоих вариантов будет рассчитываться по следующей формуле:

$$K = \frac{\text{Re}(\omega) \hat{\text{Re}}(\omega) + \text{Im}(\omega) \hat{\text{Im}}(\omega)}{A(\omega)} + \sqrt{\frac{[\text{Re}(\omega) \hat{\text{Re}}(\omega) + \text{Im}(\omega) \hat{\text{Im}}(\omega)]^2 - [A(\omega)]^2 \cdot [A(\omega) - \eta^2]}{A(\omega)}}.$$

5. Инженерная методика настройки параметров

Если объект можно упрощенно аппроксимировать аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием и соотношение $0.1 < \tau/T < 0.4$, то для быстрой первичной настройки можно использовать следующие инженерные формулы, ориентированные на 90 % -ную степень затухания переходного процесса:

$$K_p = \frac{0.5T_o}{K_o \tau_o}; T_{ин} = 0.75T_o; K_k = 0.6K_{ПИ};$$

$$\tau_k = 0.65\tau_o; T_k = 0.3T_o,$$

В случае необходимости более точного расчета и использования модели объекта высокого порядка настройка ПИ-К-регулятора производится по специальным номограммам. Получение соответствующих расчетных зависимостей является предметом дальнейших исследований.

6. Результаты исследований

Для сравнительного анализа изложенных методов выбран инерционный контур регулирования соотношения вода–топливо пылеугольного энерго-

блока 300 МВт. Идентификация объекта управления проведена с помощью активных экспериментов [7]. За основу взят эквивалентный объект второго порядка с запаздыванием

$$W_o = \frac{2.3}{(98s + 1)(49s + 1)} e^{-10s}.$$

Для первичной настройки ПИ-К-регулятора по инженерным методикам был использован эквивалентный объект первого порядка с запаздыванием:

$$W_{o1} = \frac{2.3}{120s + 1} e^{-35s}.$$

Выбранный контур регулирования интересен тем, что при изменении нагрузки энергоблока существенно меняется коэффициент передачи: при максимальной нагрузке (300 МВт) коэффициент передачи равен 2.3 °C/%, а при минимальной нагрузке в двухкорпусном режиме (220 МВт) он составляет 4.1 °C/%. Временные характеристики меняются менее существенно, в частности транспортное запаздывание в номинальном режиме составляет 10 с, а при минимальной нагрузке – 15 с.

В базовом варианте на ТЭС для управления подачей топлива используется классический, довольно грубый ПИ-регулятор. В частности, на Трипольской ТЭС настройки базовых ПИ-регуляторов производились на степень затухания 95 %, что обеспечивало стабильную, но медленную работу АСР.

Для сравнения рассмотрим работу ПИ, ПИ-КТ, ПИ-КТ² и ПИ-КТ²-регуляторов в двух режимах функционирования котла: номинальном (300 МВт) и на нижнем уровне нагрузки (220 МВт).

Таблица 1

Настройки регуляторов					
Регулятор	K_p	$T_{ин}$	K_k	T_k	τ_k
ПИ	0.43	60	–	–	–
ПИ-КТ	0.9	100	0.54	33	22
ПИ-КТ	0.9	100	0.27	–	42
ПИ-КТ ²	0.9	100	0.34	22.7	–

В табл. 2 приведены результаты моделирования работы систем регулирования.

Таблица 2

Сравнение показателей качества			
Показатель качества	Регулятор	Нагрузка, МВт	
		300	220
Степень затухания	ПИ	93	76
	ПИ-КТ	99	95
	ПИ-КТ	98	97
	ПИ-КТ ²	97	99
Время регулирования	ПИ	720	880
	ПИ-КТ	480	380
	ПИ-КТ	510	365
	ПИ-КТ ²	540	375
IAE	ПИ	216.2	332.8
	ПИ-КТ	134.7	141.6
	ПИ-КТ	148.3	151.3
	ПИ-КТ ²	156.7	155.6

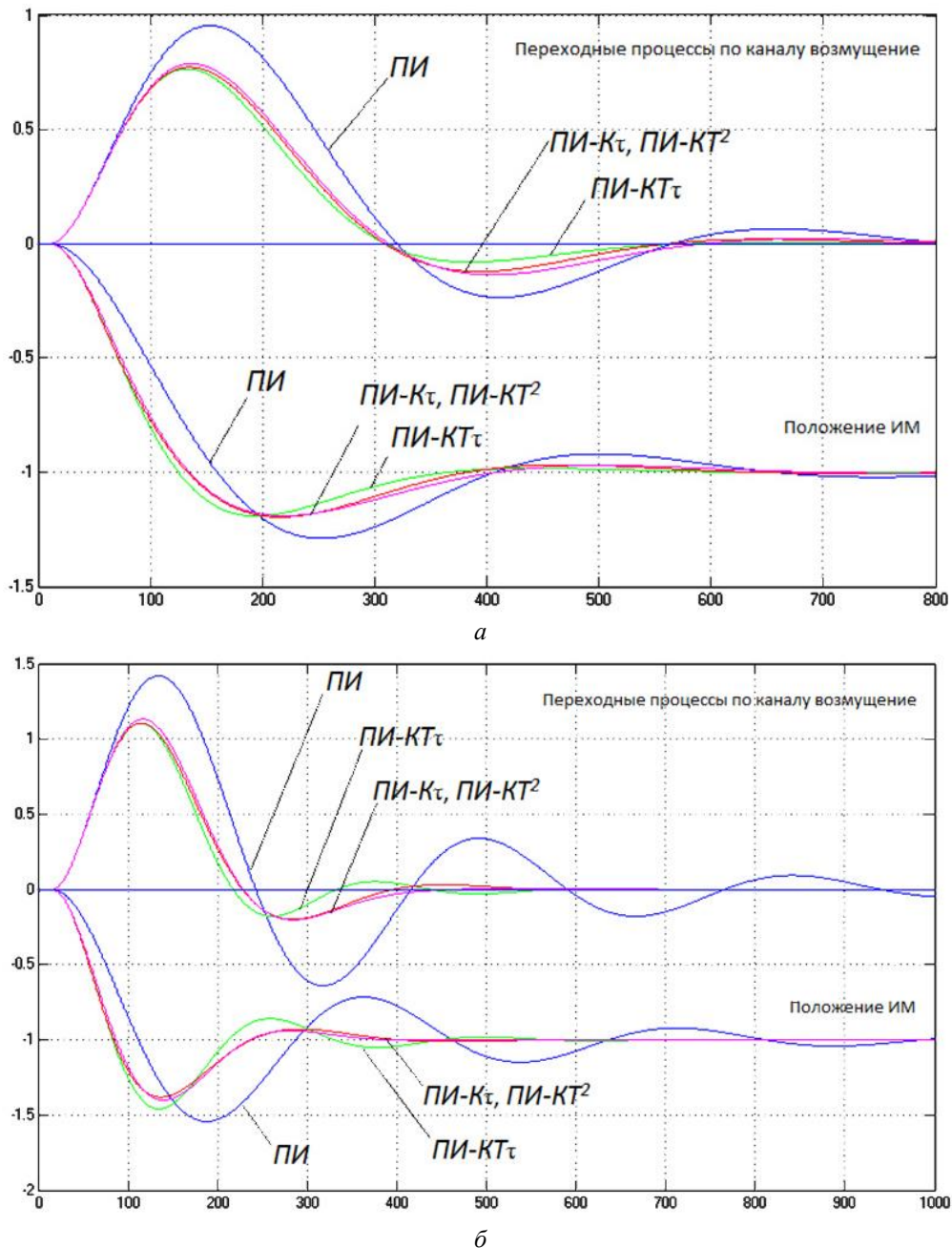


Рис. 4. Переходные процессы по каналу возмущение-выход: *a* – 300 МВт; *б* – 220 МВт

7. Выводы

1. Использование корректирующего канала одновременно с форсированием штатного ПИ-регулятора также позволяет добиться улучшения прямых показателей качества, таких как динамический заброс, время регулирования и степень затухания колебаний системы в маневренных режимах.

2. Аналитические и инженерные методики настройки параметров динамического корректора дают сравнительно одинаковые переходные процессы. То же самое можно говорить и о различных структурах динамического корректора.

3. Если передаточная функция объекта управления достаточно простая, то рекомендуется использовать инженерную методику настройки корректора, в противном случае – аналитическую методику настройки.

4. Предложенные структуры обеспечивают плавную работу исполнительного механизма и уменьшают количество включений, что продлевает срок эксплуатации оборудования.

5. Метод динамической коррекции рекомендуется использовать для модернизации САУ инерционных контуров, где используются ПИ-регуляторы. Такая система нечувствительна к шумам измерения и одновременно обладает высоким запасом устойчивости, робастна, а также проста в реализации и может быть легко воспринята практиками.

Литература

1. O’Dwyer, A. Handbook of PI and PID controller tuning rules [Text] / A. O’Dwyer. – 3rd ed. – ICP, 2010. – 623 p.
 2. Astrom, K. J. PID controllers: Theory, design, and tuning [Text] / K. J. Astrom, T. Hagglund. – NC: Instrument Society of America, Research Triangle Park, 1995. –

354 p. – Available at: <https://aiecp.files.wordpress.com/2012/07/1-0-1-k-j-astrom-pid-controllers-theory-design-and-tuning-2ed.pdf>

3. Morari, M. Robust process control [Text] / M. Morari, E. Zafriro. – New Jersey: Prentice Hall-Englewood Cliffs, 1989. – 479 p.

4. Vilanova, R. IMC based robust PID design: tuning guidelines and automatic tuning [Text] / R. Vilanova // Journal of Process Control. – 2008. – Vol. 18, Issue 1. – P. 61–70. doi: 10.1016/j.jprocont.2007.05.004

5. Alcántara, S. Generalized Internal Model Control for balancing input/output disturbance response [Text] / S. Alcántara, C. Pedret, R. Vilanova, S. Skogestad // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2011. – Vol. 50, Issue 19. – P. 11170–11180. doi: 10.1021/ie200717z

6. Пат. 67725 UA. Спосіб автоматического регулювання параметрів інерційних об'єктів з запаздываниєм [Текст] / Ковриго Ю. М., Коновалов М. А., Бунке А. С. – Промышленная собственность. 2012. Бюл. № 5.

7. Ковриго, Ю. М. Модернизация системы управления тепловой нагрузкой прямоточного котлоагрегата ТЭС с использованием динамического корректора [Текст] / Ю. М. Ковриго, М. А. Коновалов, А. С. Бунке // Теплоэнергетика. – 2012. – № 10. – С. 43–49.

8. Shinsky, F. G. PID-deadtime control of distributed processes [Text] / F. G. Shinsky // Control Engineering Practice. – 2001. – Vol. 9, Issue 11. – P. 1177–1183. doi: 10.1016/S0967-0661(01)00063-6

References

1. O'Dwyer, A. (2010). Handbook of PI and PID controller tuning rules. ICP, 623.

2. Astrom, K. J., Hagglund, T. (1995). PID controllers: Theory, design, and tuning. NC: Instrument Society of America, Research Triangle Park, 354. Available at: <https://aiecp.files.wordpress.com/2012/07/1-0-1-k-j-astrom-pid-controllers-theory-design-and-tuning-2ed.pdf>

3. Morari, M., Zafiriou, E. (1989). Robust process control. New Jersey: Prentice Hall-Englewood Cliffs, 479.

4. Vilanova, R. (2008). IMC based Robust PID design: Tuning guidelines and automatic tuning. Journal of Process Control, 18 (1), 61–70. doi: 10.1016/j.jprocont.2007.05.004

5. Alcántara, S., Pedret, C., Vilanova, R., Skogestad, S. (2011). Generalized Internal Model Control for Balancing Input/Output Disturbance Response. Industrial & Engineering Chemistry Research, 50 (19), 11170–11180. doi: 10.1021/ie200717z

6. Kovrygo, J. M., Konovalov, M. A., Bunke, A. S. (2012). Pat. 67725 UA. Sposob avtomaticheskogo regulirovaniya parametrov inercionnyh obectov s zapazdyvaniem. Promyshlennaja sobstvennost. № 5.

7. Kovrygo, J. M., Konovalov, M. A., Bunke, A. S. (2012). Modernizacija sistemy teplovoj nagruzkoj prjamochnogo kotloagregata TES s ispolzovaniem dinamicheskogo korreктора. Teploenergetika, 10, 43–49.

8. Shinsky, F. G. (2001). PID-deadtime control of distributed processes. Control Engineering Practice, 9 (11), 1177–1183. doi: 10.1016/S0967-0661(01)00063-6

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Трезуб В. Г.
Дата надходження рукопису 24.12.2015*

Ковриго Юрий Михайлович, кандидат технических наук, профессор, кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

Бунке Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

Новиков Павел Валерьевич, аспирант, кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

УДК 621.01:531

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.58823

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕГРОВАНОГО ЧИСЕЛЬНОГО МЕТОДУ РЕАЛІЗАЦІЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ МЕХАНІЧНОЇ КОЛІВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

© П. В. Дяченко

Виконано порівняльний аналіз точності знаходження розв'язків системи лінійних диференціальних рівнянь у часовій області для розробленого інтегрованого, та низки відомих класичних чисельних методів. На тестових модельних прикладах показано високу ефективність запропонованого чисельного методу, стосовно задачі аналізу динамічних процесів механічних коливальних систем

Ключові слова: математична модель, часова область, коливальна система, чисельний метод, похибка обчислення

A comparative analysis of the accuracy solutions of linear differential equations in the time domain to the developed integrated and a number of famous classical numerical methods is done. Test model examples show the high efficiency of the proposed numerical method regarding problems of analysis of dynamic processes of mechanical oscillatory systems

Keywords: mathematical model, time domain, oscillatory system, numerical method, calculation error