

УДК 681.51.01

**Иносков Сергей Викторович**

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов,  
*orcid.org/0000-0001-8305-5514*

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев*

**Скиданов Владимир Михайлович**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов,  
*orcid.org/0000-0001-1761-487X*

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев*

**Соболевская Татьяна Григорьевна**

Ассистент кафедры автоматизации технологических процессов, *orcid.org/0000-0003-4853-2367*

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев*

**Сидун Екатерина Васильевна**

Ассистент кафедры автоматизации технологических процессов, *orcid.org/0000-0003-4778-5100*

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев*

## СИНФАЗНЫЕ И ПРОТИВОФАЗНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЕ СВЯЗНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

*Аннотация.* В системе зонального автоматического регулирования температур между контурами регулирования посредством теплообмена между зонами возникают сильные положительные перекрестные связи. В ходе исследования обнаружено, что любые возмущения в связанной двухконтурной системе автоматического регулирования могут быть представлены как сумма синфазных и противофазных возмущений. На первые возмущения система реагирует быстро, на вторые – на порядок медленнее. При расчете можно применять принцип суперпозиции, суммируя реакции на указанные составляющие. Рекомендуется избегать противофазных составляющих возмущений. Так, при программном регулировании зональных температур рекомендуется изменять зональные задания синхронно. В противном случае резко увеличивается время регулирования и динамические ошибки. Для систем двухконтурного регулирования с отрицательными перекрестными связями между контурами (например, регулирование температуры и влажности воздуха) все указанные рекомендации изменяются на противоположные.

*Ключевые слова:* синфазные возмущения; противофазные возмущения; связанное регулирование; двухконтурное регулирование; быстрдействие

### Постановка проблемы

Как установлено в ходе моделирования динамики двухконтурной связанной системы автоматического регулирования с сильными положительными перекрестными связями, быстрдействие регулирования при противофазных возмущениях на порядок ниже, чем при синфазных возмущениях. Изучение обнаруженного явления представляет практический интерес, например, для зонального регулирования температур.

### Анализ последних исследований и публикаций

Задачей системы автоматического регулирования является поддержание на заданном уровне каких-либо технологических параметров (например,

температур) [1]. В большинстве случаев используется принцип регулирования по отклонению от задания, с контуром отрицательной обратной связи [1; 2]. В качестве алгоритма регулирования, как правило, используется ПИД-регулятор (пропорционально – интегрально – дифференциальный) или его частный случай – ПИ-регулятор [1; 3]. При динамических расчетах предполагается линейность и стационарность объекта регулирования [1 – 3]. Качество регулирования оценивается по динамическим критериям [4; 5]. Основными из них являются время регулирования (которое следует минимизировать за счет правильной настройки параметров регулятора), либо частотный диапазон эффективного регулирования (который следует максимизировать). Для расчетов используются операционное

исчисление [6] на основе преобразования Лапласа, частотные методы [7] на базе преобразования Фурье, численные шаговые методы решения дифференциальных уравнений (реализованные в специализированных компьютерных программах моделирования динамики [9]). При динамических расчетах многоконтурных связанных систем автоматического регулирования используются матричные модели [8 – 10]. В данной работе исследуется частный случай, а именно, двухконтурная система связанного автоматического регулирования с сильными положительными перекрестными связями в объекте регулирования, лишь незначительно отличающимися от прямых связей.

### Цель статьи

Как установлено в ходе моделирования динамики двухконтурной связанной системы автоматического регулирования с сильными положительными перекрестными связями, синфазные возмущения компенсируются на порядок быстрее, чем противофазные возмущения. Например, одновременно повысить (понизить) зональные температуры можно значительно быстрее, чем выровнять их или наоборот сделать различными. Целью работы является детальное исследование обнаруженного явления.

### Изложение основного материала

В качестве иллюстративного примера рассматривается система двухконтурного автоматического зонального регулирования температуры. На рис. 1 приведена функциональная схема такой системы.

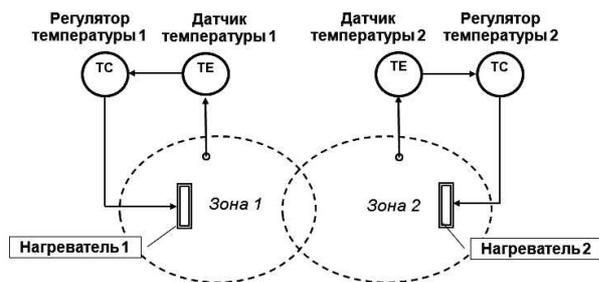


Рисунок 1 – Функциональная схема двухконтурной системы зонального автоматического регулирования температуры

Особенностью такой системы является наличие сильных положительных перекрестных связей между контурами регулирования через теплообмен между зонами в объекте регулирования.

На рис. 2 приведена структурная схема двухконтурной системы зонального автоматического регулирования температуры. Она включает объект регулирования и два регулятора. В качестве регулируемых величин присутствуют две зональные

температуры. В качестве управляющих воздействий присутствуют две зональные мощности нагрева. Принцип регулирования – по отклонению (отклонение температуры от задания вызывает корректировку мощности нагрева).

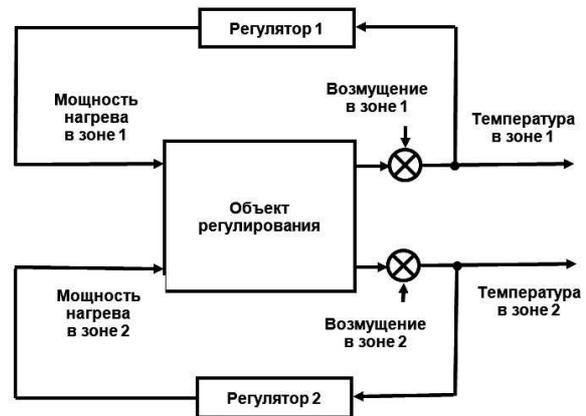


Рисунок 2 – Структурная схема двухконтурной системы зонального автоматического регулирования температуры

При динамических расчетах внешние возмущения традиционно считаются приведенными к выходу объекта [11].

На рис. 3 приведена внутренняя структура расчетной динамической модели объекта регулирования с перекрестными связями. Входами объекта являются зональные мощности нагрева в % (диапазон изменения от 0 до 100%). Выходами являются зональные температуры в градусах.

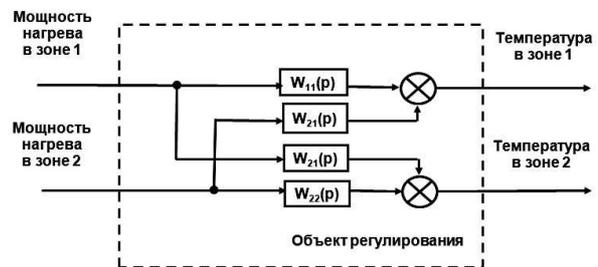


Рисунок 3 – Модель объекта регулирования с перекрестными связями

Динамические свойства объекта регулирования описываются матрицей передаточных функций:

$$W(p) = \begin{pmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) \end{pmatrix}.$$

Прямые (внутризональные) связи соответствуют диагональным элементам матрицы ( $W_{11}(p)$ ,  $W_{22}(p)$ ), остальные элементы ( $W_{12}(p)$ ,  $W_{21}(p)$ ) соответствуют перекрестным связям (между зонами).

Передаточные функции от комплексного аргумента  $p$  являются математическими моделями, которыми традиционно описывают динамические свойства линейных инерционных стационарных объектов [1; 2; 4; 5]. Передаточную функцию можно интерпретировать как формульное представление

амплитудно-фазо-частотной характеристики (АФЧХ), то есть зависимости комплексного коэффициента усиления от частоты. Для этого вместо  $p$  следует подставить  $j\omega$ , где  $\omega$  – круговая частота,  $j$  – мнимая единица.

Принятая внутренняя структура связей из элементарных динамических звеньев показана на рис. 4.

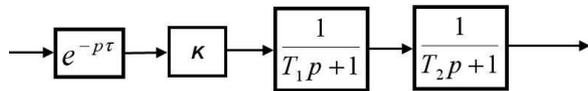


Рисунок 4 – Динамическая модель связей в объекте регулирования

Приведенная структура может считаться универсальной и пригодной для любых тепловых объектов, так как она учитывает все существенные особенности таких объектов: статизм, наличие аperiodических инерционностей (учитываются две основные с постоянными времени  $T_1$  и  $T_2$ ) и наличие запаздывания  $e^{-pT_3}$ , которое относительно мало в общей инерционности объекта, но существенно ухудшает качество регулирования. Даже если объект не имеет «транспортного» запаздывания, передаточная функция  $e^{-pT_3}$  интегрально учитывает все малые инерционности, не учтенные двумя основными постоянными времени.

Соответствующая передаточная функция связи имеет вид:

$$W_0(p) = \frac{K \cdot e^{-pT_3}}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)},$$

где  $K$  – статический коэффициент передачи объекта;  $T_3$  – время запаздывания;  $T_1, T_2$  – первая и вторая постоянные времени объекта.

Предполагаем, что все четыре внутренние связи в объекте идентичны, за исключением разных статических коэффициентов  $K$  для прямых и перекрестных связей (перекрестные связи несколько слабее).

Исследование осуществлялось путем моделирования динамики двухконтурного автоматического связного регулирования в реальном ускоренном времени с помощью программного средства VisSim (Visual Simulation). Для иллюстративного численного примера приняты следующие численные значения параметров объекта регулирования:  $\tau = 0.002$  ч (время запаздывания);  $T_1 = 0.5$  ч,  $T_2 = 0.15$  ч (постоянные времени);  $K_{11} = K_{22} = 0.2$  град/% (статические коэффициенты передачи прямых связей);  $K_{12} = K_{21} = 0.15$  град/% (статические коэффициенты передачи перекрестных связей).

Передаточная функция ПИ-регулятора стандартно записывается в виде [3]

$$W_1(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right),$$

где  $K_p$  – коэффициент пропорциональности;  $T_i$  – постоянная времени интегрирования.

ПИ-регулятор содержит два параллельных канала – пропорциональный и интегрирующий ( $1/p$  – передаточная функция интегрирования). Усиление по каналам задается настройкой параметров  $K_p, T_i$ . Оптимальная настройка зависит от динамических свойств объекта регулирования. Для исследуемого случая численные значения параметров настройки обоих ПИ-регуляторов выбраны оптимальными из условия максимального быстродействия (минимум времени регулирования) для данного объекта. А именно:  $K_p = 3$  %/град,  $T_i = 0.5$  ч.

Традиционно время регулирования рассчитывается при возмущении типа «единичный скачок». Мгновенный скачок температуры следует рассматривать как наиболее тяжелый случай, достижимый для неконтролируемых возмущений лишь как теоретический предел. Однако в пробном эксперименте такое возмущение легко реализуется при скачке задания (контролируемое возмущение). Под терминами «синфазные» и «противофазные» возмущения подразумеваем синхронные возмущения в обоих контурах регулирования одного знака или противоположных знаков соответственно.

Как установлено в ходе моделирования динамики двухконтурной связной системы автоматического регулирования с сильными положительными перекрестными связями, синфазные возмущения компенсируются на порядок быстрее, чем противофазные возмущения. Например, одновременно повысить (понижить) зональные температуры можно значительно быстрее, чем выровнять их или наоборот сделать различными.

На рис. 5 приведена реакция зональных температур на одновременные противофазные возмущения.

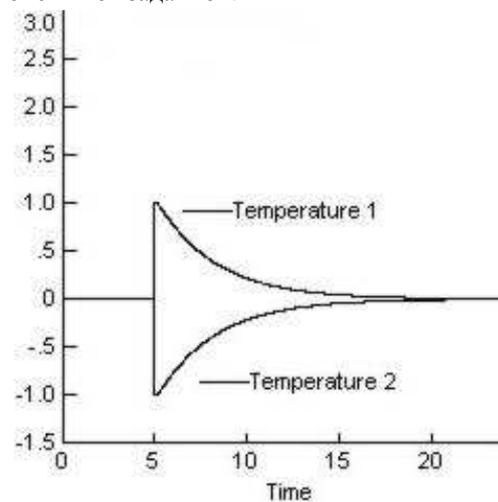


Рисунок 5 – Реакция зональных температур на одновременные противофазные возмущения

При синфазних возмущениях (рис. 6) время регулирования на порядок меньше, чем в предыдущем случае (рис. 5). То есть качество регулирования (быстродействие) на порядок лучше.

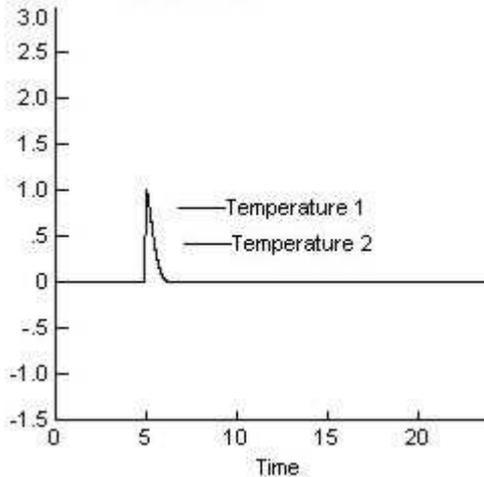


Рисунок 6 – Реакция зональных температур на одновременные синфазные возмущения (графики совпадают)

Обобщая, можно сказать, что любые зональные возмущения  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$  (а не только скачки) могут быть разложены на сумму синфазных изменений  $a(t)$  и противофазных изменений  $b(t)$ :

$$\begin{cases} R_1(t) = a(t) + b(t) \\ R_2(t) = a(t) - b(t) \end{cases}, \text{ где } \begin{cases} a(t) = \frac{R_1(t) + R_2(t)}{2} \\ b(t) = \frac{R_1(t) - R_2(t)}{2} \end{cases}$$

Например, возмущение только в одном контуре (рис. 7) можно представить как сумму синфазных и противофазных возмущений в обоих контурах (варианты на рис. 5 и 6, действующие одновременно).

Можно применять принцип суперпозиции, суммируя реакции на указанные составляющие (что вытекает из линейности объекта). При этом синфазная составляющая  $a(t)$  обрабатывается быстро, противофазная составляющая  $b(t)$  обрабатывается значительно медленнее.

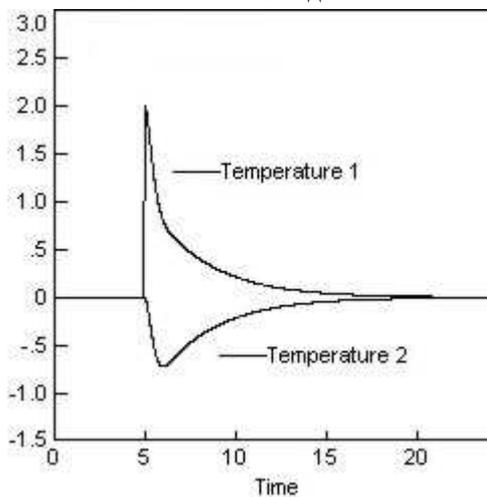


Рисунок 7 – Реакция зональных температур на возмущение в одной зоне

Практический вывод: для повышения быстродействия системы противофазная составляющая возмущений должна быть, по возможности, минимизирована. Например, желательно, чтобы возмущения изменялись синхронно. Любые нарушения синхронности приводят к резкому возрастанию динамических ошибок и времени регулирования (рис. 8). К неконтролируемым возмущениям эту рекомендацию трудно применить, но задания в контурах (контролируемое возмущение) вполне реально изменять одновременно.

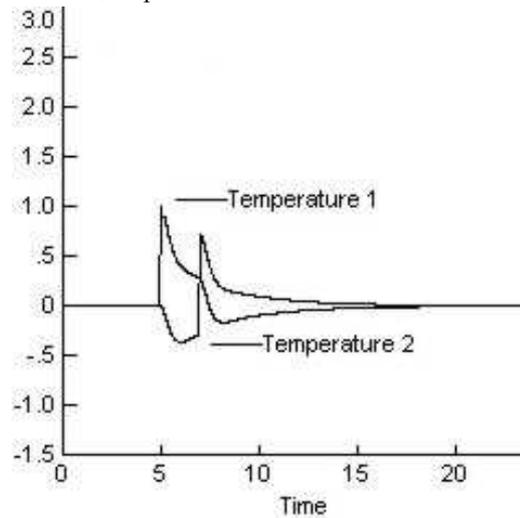


Рисунок 8 – Реакция зональных температур на синфазные возмущения при неточной их синхронизации

На рис. 9 приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) всей системы по каналу «возмущение – регулируемая величина» для синфазных и противофазных воздействий. Частота (горизонтальная ось) указана в рад/час. Вертикальная ось безразмерна. На низких частотах система автоматического регулирования эффективно подавляет возмущения (ЛАЧХ значительно меньше единицы). На высоких частотах система не успевает реагировать из-за инерционности объекта.

Из рис. 9 видно, что система связанного двухконтурного автоматического регулирования имеет на порядок более широкий частотный диапазон эффективного регулирования для синфазных возмущений, чем для противофазных.

Для систем двухконтурного регулирования с отрицательными перекрестными связями между контурами все предыдущие выводы и рекомендации меняются на противоположные. В качестве примера на рис. 10 приведена функциональная схема двухконтурной системы автоматического регулирования температуры  $T$  и влажности воздуха  $M$ . Увеличение температуры в качестве побочного эффекта вызывает уменьшение влажности. Увеличение влажности в качестве побочного

эффекта приводит к снижению температуры (отрицательные перекрестные связи).

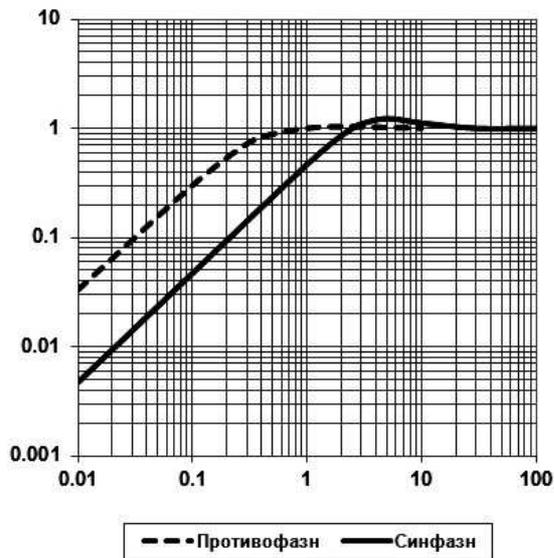


Рисунок 9 – ЛАЧХ системы по каналу «возмущение – регулируемая величина» для синфазных и противофазных возмущений

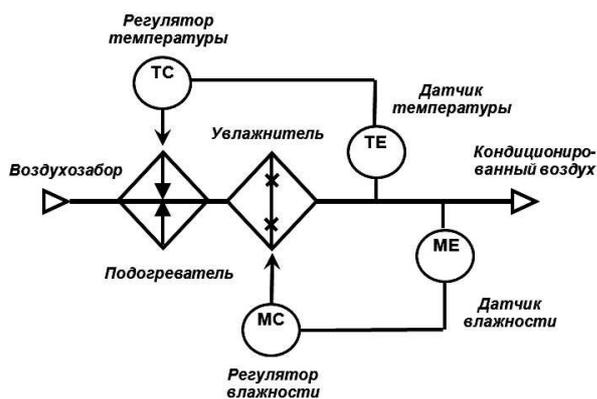


Рисунок 10 – Функциональная схема двухконтурной системы автоматического регулирования температуры и влажности воздуха (с отрицательными перекрестными связями)

В данном случае противофазные возмущения значительно более благоприятны, чем синфазные, как с точки зрения быстродействия, так и частотного диапазона.

## Выводы

1. В системе зонального автоматического регулирования температур между контурами регулирования возникают сильные положительные перекрестные связи, посредством теплообмена между зонами.

2. Любые возмущения в связанной двухконтурной системе автоматического регулирования могут быть представлены как сумма синфазных и противофазных возмущений. На первые возмущения система реагирует быстро, на вторые – на порядок медленнее. При расчете можно применять принцип суперпозиции, суммируя реакции на указанные составляющие.

3. Рекомендуется избегать противофазных составляющих возмущений. Так, при программном регулировании зональных температур рекомендуется изменять зональные задания синхронно. В противном случае резко увеличивается время регулирования и динамические ошибки.

4. С точки зрения частотного подхода система связанного двухконтурного автоматического регулирования имеет значительно более широкий частотный диапазон эффективного регулирования для синфазных возмущений, чем для противофазных.

5. Для систем двухконтурного регулирования с отрицательными перекрестными связями между контурами (например, регулирование температуры и влажности воздуха) все указанные рекомендации изменяются на противоположные. С точки зрения быстродействия и частотного диапазона противофазные возмущения в этом случае оказываются значительно более благоприятными, чем синфазные.

## Список литературы

1. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теория автоматического керування: Підручник. – К. : Либідь, 2007. – 656 с.
2. Ладанюк А.П., Архангельська К.С. Теория автоматического керування (частина I): Конспект лекцій. – К.: НУХТ, 2007. – 102 с.
3. Иносов С.В., Корниенко В.М. Оптимизация алгоритма автоматического регулирования тепловыми процессами // Управління розвитком складних систем. – 2013. – № 13. – С. 104-108.
4. Марченко Ю.Н. Теория автоматического регулирования: Конспект лекцій. – Новокузнецк, Новокузнецкий филиал Кемеровского государственного университета, 2002. – 69 с.
5. Абраменко І.Г., Абраменко Д.І. Теория автоматического керування: Конспект лекцій. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 178 с.
6. Плескунов М.А. Операционное исчисление: Учебное пособие. – Екатеринбург: изд-во Уральского ун-та, 2014. – 141 с.
7. Вадутов О.С. Математические основы обработки сигналов: Учебное пособие. – Томск: изд-во Томского политехнического уни-та, 2011. – 212 с.

8. Биленко В.А. Многоконтурные автоматические системы регулирования с несколькими регулирующими воздействиями и их применение для поддержания температуры пара прямоточных котлов // *Теплоэнергетика*, 2011. – № 10. – С. 51-59.
9. Федосов Б.Т. Многомерные объекты. Описание, анализ и управление. – Рудный, Казахстан, Рудненский индустриальный институт, 2014. – 28 с.
10. Иносов С.В., Бондарчук О.В. Влияние перекрестных связей в объекте на динамику двухконтурного автоматического регулирования // *Управління розвитком складних систем*. – 2012. – № 12. – С. 170-173.
11. Иносов С.В., Соболевская Т.Г., Сидун Е.В. Исследование температурных возмущений для систем автоматизации отопления зданий // *Управління розвитком складних систем*. – 2011. – № 6. – С. 159-161.

Статья поступила в редколлегию 14.07.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.В. Мыслович, заведующий научным отделом Института электродинамики НАН Украины, Киев.

**Иносов Сергій Вікторович**

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів, [orcid.org/0000-0001-8305-5514](https://orcid.org/0000-0001-8305-5514)  
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Скіданов Володимир Михайлович**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів, [orcid.org/0000-0001-1761-487X](https://orcid.org/0000-0001-1761-487X)  
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Соболевська Тетяна Григорівна**

Асистент кафедри автоматизації технологічних процесів, [orcid.org/0000-0003-4853-2367](https://orcid.org/0000-0003-4853-2367)  
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**Сідун Катерина Василівна**

Асистент кафедри автоматизації технологічних процесів, [orcid.org/0000-0003-4778-5100](https://orcid.org/0000-0003-4778-5100)  
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**СИНФАЗНІ І ПРОТИВОФАЗНІ ЗБУРЕННЯ В ДВОКОНТУРНІЙ СИСТЕМІ  
ЗВ'ЯЗНОГО РЕГУЛЮВАННЯ**

**Анотація.** В системі зонального автоматичного регулювання температур між контурами регулювання через теплообмін між зонами виникають сильні позитивні перехресні зв'язки. У ході дослідження виявлено, що будь-які збурення в зв'язаній двоконтурній системі автоматичного регулювання можуть бути представлені як сума синфазних і протифазних збурень. На перші збурення система реагує швидко, на другі – на порядок повільніше. При розрахунку можна застосовувати принцип суперпозиції, підсумовуючи реакції на зазначені складові. Рекомендується уникати протифазних складових збурень. Так, при програмному регулюванні зональних температур рекомендується змінювати зональні завдання синхронно. В іншому випадку різко збільшується час регулювання і динамічні похибки. Для систем двоконтурного регулювання з негативними перехресними зв'язками між контурами (наприклад, регулювання температури і вологості повітря) всі зазначені рекомендації змінюються на протилежні.

**Ключові слова:** синфазні збурення; протифазні збурення; зв'язне регулювання; двоконтурне регулювання; швидкокодія

**Inosov Sergei**

Associate professor, Department of Process Automation, [orcid.org/0000-0001-8305-5514](https://orcid.org/0000-0001-8305-5514)  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

**Skidanov Vladimir**

Professor, Head of the Department of Process Automation, [orcid.org/0000-0001-1761-487X](https://orcid.org/0000-0001-1761-487X)  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

**Sobolevskaya Tatiana**

Assistant, Department of Process Automation, [orcid.org/0000-0003-4853-2367](https://orcid.org/0000-0003-4853-2367)  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

**Sidun Ekaterina**

Assistant, Department of Process Automation, [orcid.org/0000-0003-4778-5100](https://orcid.org/0000-0003-4778-5100)  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

**IN-PHASE AND ANTI-PHASE DISTURBANCES IN THE DOUBLE-LOOP SYSTEM OF INTERCONNECTED REGULATION**

**Abstract.** In a system of automatic control of zonal temperatures there are strong positive inter-relationships between the loops through heat exchange between zones. Any disturbance in a double-loop automatic control system can be represented as the sum of in-phase and anti-phase disturbances. The system responds quickly to the first one, but to the second one the reaction is an order of magnitude slower. When calculating, it is possible to apply the principle of superposition, summing up the reactions to above-mentioned components. It is recommended to avoid anti-phase component of the disturbance. For example, when regulating zonal temperatures, it is recommended to change the set temperatures synchronously. Otherwise, regulation time and dynamic errors dramatically increase. From the point of view of the frequency approach, the double-loop automatic control system has much broader frequency range of effective regulation for in-phase disturbances than for anti-phase disturbances. For automatic control systems with negative cross-connections between loops (e.g., regulation of temperature and air humidity), all above-mentioned recommendations change to the opposite.

**Keywords:** in-phase disturbance, anti-phase disturbance, interconnected regulation, double-loop system; performance

**References**

1. Popovich, M.G., Kovalchuk, V.A. (2007). *Theory of automatic management: Textbook*. K.: Lybid, 656.
2. Ladaniuc, A.P., Arkhangelskaya, K.S. (2007). *Theory of automatic control (part I): Abstract of lectures*. K.: KNUCA, 102.
3. Inosov, S.V., Kornienko V.M. (2013). *Optimization of the algorithm for automatic control of thermal processes. Management of development of complex systems*, 13, 104–108.
4. Marchenko, U.N. (2002). *Theory of automatic control: the Abstract of lectures*. Novokuznetsk, Novokuznetsk branch of Kemerovo state University, 69.
5. Abramenko, G.I., Abramenko, D.I. (2008). *Theory of automatic control: the Abstract of lectures*. Kharkov: HNAMEG, 178.
6. Pleskanov, M.A. (2014). *Operational calculus: a tutorial*. – Ekaterinburg. Publishing house of the Ural University, 141.
7. Vadutov, O.S. (2011). *Mathematical foundations of signal processing: a tutorial*. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic's University, 212.
8. Bilenko, V.A. (2011). *Multiloop systems automatic regulation with several regulatory inputs and their application to maintaining the temperature of the steam direct-flow boilers*. *Heat Power engineering*, 10, 51–59.
9. Fedosov, B.T. (2014). *Multi-dimensional objects. Description, analysis and management*. Rudnyy, Kazakhstan: Rudny industrial Institute, 28.
10. Inosov, S.V., Bondarchuk, A.V. (2012). *The effect of cross-linking in the object at the dynamics of double-circuit automatic control*. *Management of development of complex systems*, 12, 170–173.
11. Inosov, S.V., Sobolevskaya, E.T., Sidun, K.V. (2011). *The study of temperature disturbances in systems of automatic control of heating of buildings*. *Management of development of complex systems*, 6, 159–161.

**Ссылка на публикацию**

- APA Inosov, Sergei, Skidanov, Vladimir, Sobolevskaya, Tatiyana, & Sidun, Katerina. (2016). *Measurement of the specific thermal resistance of building materials with wire probe in quasi-stationary mode*. *Management of development of complex systems*, 27, 176 – 182.
- ГОСТ Иносов С. В. Синфазные и противофазные возмущения в двухконтурной системе связного регулирования / С.В Иносов, В.М Скиданов, Т.Г. Соболевская, К.В. Сидун // *Управление развитием сложных систем*. – 2016. – № 27. – С. 176 – 182.