

УДК 681.51:338.364

ОПЕРАТИВНАЯ КОРРЕКТИРОВКА НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ПРИ КОСВЕННОМ УПРАВЛЕНИИ

Захарова О.В., Раков В.И.

*ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орёл,
e-mail: rakov2010vi@mail.ru, cvaig@mail.ru*

Сформулирована общая потребность оперативного корректирования алгоритмов регулирования для достижения требуемого функционирования цифровых регуляторов и выделена задача косвенного управления, когда динамика регулируемой величины определяется изменением потока настроечных параметров. Отмечено, что при косвенном управлении в автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУТП) как в трёхъярусной системе автоматизации взаимодействие промышленного контроллера (ПК) более высокого уровня Control с цифровыми регуляторами (ЦКР) уровня Input/output организуется как взаимодействие с локальными регуляторами системы управления. Предложено считать, что именно это разделение провоцирует прерывание процессов регулирования при неподходящем функционировании цифровых регуляторов, что может вызвать задержку, останов или предаварийную ситуацию в функционировании технологического процесса. Для предотвращения этого предложена идея корректировки регулируемых параметров посредством организации в оперативном режиме временной вычислительной системы «ПК – ЦКР» и алгоритм косвенного управления для классической итерационной модели цифрового ПИД-регулирования. Модельные эксперименты предложенного процесса корректировки настроечных параметров показали продуктивность использования идеи изменения алгоритмов регулирования посредством оперативной корректировки настроечных параметров в процессе регулирования.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления технологическими процессами, косвенное управление, цифровой регулятор, цифровой контурный регулятор, настроечные параметры регулятора, алгоритм регулирования

QUICK CHANGING SETTINGS DIGITAL CONTROLS FOR INDIRECT CONTROL

Zakharova O.V., Rakov V.I.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev», Orel, e-mail: rakov2010vi@mail.ru, cvaig@mail.ru

Formulated the need for operational adjustment of the control algorithms to achieve the required functioning digital controllers. It is shown that under indirect management the industrial controller (level Control) interacts with digital controllers (level Input/Output) as local regulators. The view that the division into levels provokes the interruption of the regulatory process and may delay, stop or call a pre-emergency situation in the operation process. To prevent this, proposed the idea of adjusting the adjustable parameters through the organization of online temporary computing systems «industrial controller – digital contour controller» and the indirect control algorithm for the classical iterative model of the digital PID control. Model experiments for the proposed process of adjusting the parameters showed the productivity of the use of the idea of changing the control algorithms through a rapid adjustment of the tuning parameters in the regulatory process.

Keywords: automated control systems of technological processes, indirect control, digital controller, digital contour controller, tuning parameters, control algorithm

Актуальность исследования

В пятиуровневой системе автоматизации [1] уровень управления технологическими операциями (*Control*) представляется промышленными контроллерами (ПК), аналоговым или цифровым образом взаимодействующими с уровнем средств автоматического регулирования (*Input/Output*), в котором реализуются контурные регуляторы (КР) и технологическая автоматика с её защитами и блокировками. Косвенное управление [4] означает управление или регулирование посредством изменения настроечных параметров регуляторов, а в случае технологической автоматики – посредством изменения потока булевых переменных (рис. 1).

При организации цифрового регулирования в автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУТП) КР заменяют цифровыми контурными регуляторами (ЦКР) на основе коммерческих или специализированных микропроцессоров, координацию которых осуществляет ПК (уровня *Control*), направляя в ЦКР требуемый поток настроечных параметров в соответствующих обстоятельствах.

Если при такой организации согласованного функционирования цифровых контурных регуляторов результаты не обеспечат требуемую динамику регулирования, то ПК прерывает процесс регулирования и осуществляет переход к специальным программам защит и блокировок, обрабатывающих

функции алгебры логики, временные логические функции или рекуррентные булевы функции первого и второго рода [2] для ограничения негативного воздействия нештатного функционирования регуляторов на технологические процессы и оборудование. Однако всякое прерывание процессов регулирования в связи с неподходящим функционированием регуляторов может существенно ухудшить показатели качества всей АСУТП, а переход к реализации мероприятий противоаварийного характера может и вовсе остановить соответствующие технологические процессы. Поэтому решение вопросов текущего (оперативного) корректирования (изменения) алгоритмов регулирования для достижения требуемого функционирования регуляторов представляется актуальным.

В силу специфики косвенного управления в работе предложен путь изменения алгоритмов регулирования посредством оперативной корректировки настроечных параметров в процессе регулирования.

Идея корректировки

При косвенном управлении в АСУТП традиционно *ПК* уровня *Control* координирует и взаимодействует с *ЦКР* нижнего уровня *Input/Output* как с локальными регуляторами передавая соответствующие потоки уставок и настроечных параметров (рис. 2), то есть структура взаимодействия двух уровней разделяет функции своих процессорных компонентов. Именно это разделение, по-видимому, провоцирует либо прерывание процессов регулирования при неподходящем функционировании *ЦКР*, либо внедрение отказоустойчивых структур регулирования при проектировании, что, безусловно, ведёт к значительному аппаратному усложнению. Чтобы избежать усложнений аппаратуры и прерывания процессов регулирования, учитывая возможность ис-

пользования быстродействующих (высокопроизводительных) *ПК*, разделение функций *ПК* и *ЦКР* можно сделать временным или ситуационным, возложив дополнительно на *ПК* ведущую роль по восстановлению требуемой динамики регулирования в цепях *ЦКР* и оградив тем самым уровень *Input/Output* от возможной потери устойчивости регуляторами.

При оценке возможности потери устойчивости *ЦКР* ввиду не предполагаемых влияний среды *ПК* осуществляет его «захват» и управляющая программа *ПК* организует временный вычислительный комплекс «*ПК – ЦКР*» (с единой операционной системой) до момента восстановления требуемого функционирования. А восстановление требуемого функционирования *ЦКР* может быть проведено как поиск настроечных параметров и моделирование в *ПК* работы цепи регулирования с этими параметрами.

Тогда методика косвенного цифрового управления может быть представлена в следующем порядке:

1. Задание серий значений настроечных параметров:

1.1) задание значений коэффициента усиления пропорциональной составляющей: $k_{\text{п}}^1, k_{\text{п}}^2, \dots, k_{\text{п}}^X$;

1.2) задание значений коэффициента усиления интегрирующей составляющей: $k_{\text{и}}^1, k_{\text{и}}^2, \dots, k_{\text{и}}^Y$;

1.3) задание значений коэффициента усиления дифференцирующей составляющей: $k_{\text{д}}^1, k_{\text{д}}^2, \dots, k_{\text{д}}^Z$;

2. Моделирование для каждой модели ПИД-регулятора значения управляющего воздействия: $U^1(nT)$ для $k_{\text{п}}^1, k_{\text{и}}^1$ и $k_{\text{д}}^1$; $U^2(nT)$ для $k_{\text{п}}^1, k_{\text{и}}^1$ и $k_{\text{д}}^2, \dots$; $U^S(nT)$ для $k_{\text{п}}^X, k_{\text{и}}^Y$ и $k_{\text{д}}^Z$ ($S = X \cdot Y \cdot Z$).

3. Верификация управляющего воздействия и выбор лучшего варианта закона регулирования:

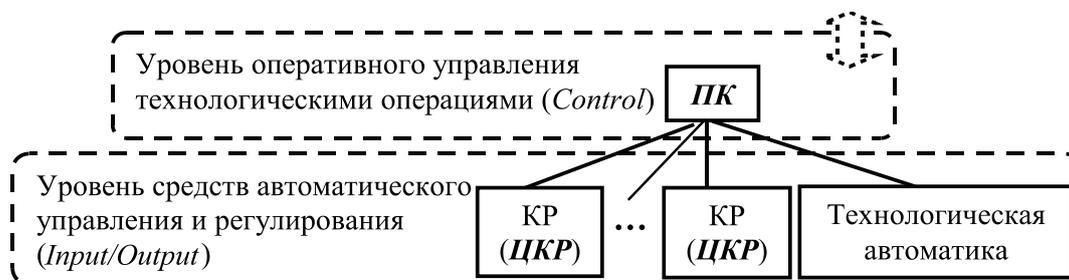


Рис. 1. Нижние уровни системы автоматизации при косвенном управлении, где: *ПК* – промышленный контроллер; *КР* – контурный регулятор; *ЦКР* – цифровой контурный регулятор

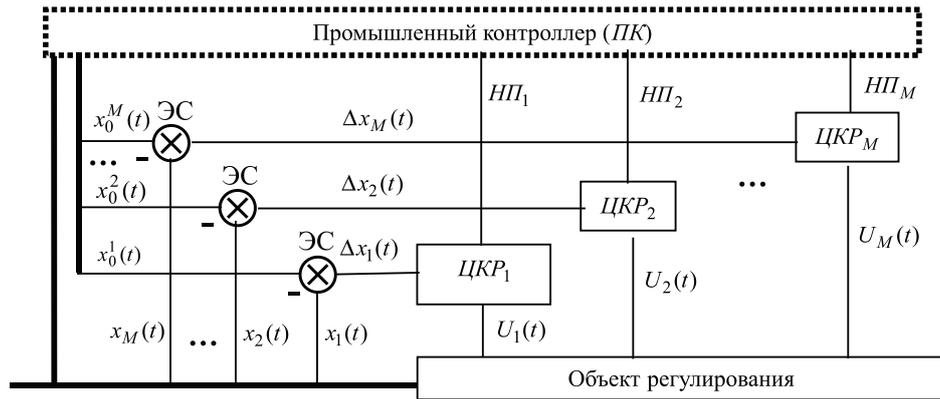


Рис. 2. Пример схематического взаимодействия уровней Control (ПК) и Input/Output (цифровые контурные регуляторы ЦКР₁, ЦКР₂, ..., ЦКР_М) системы автоматизации промышленного предприятия, где: $x_0^1(t), x_0^2(t), \dots, x_0^M(t)$ – задающие воздействия соответственно для ЦКР₁, ЦКР₂, ..., ЦКР_М; $x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)$ – регулируемые величины; $\Delta x_1(t), \Delta x_2(t), \dots, \Delta x_M(t)$ – рассогласования (отклонения, ошибки) в текущий момент, пропорциональные соответственно $x_0^1(t) - x_1(t), x_0^2(t) - x_2(t), \dots, x_0^M(t) - x_M(t)$; $U_1(t), U_2(t), \dots, U_M(t)$ – управляющие воздействия, рассчитанные соответственно регуляторами ЦКР₁, ЦКР₂, ..., ЦКР_М; $НП_1, НП_2, \dots, НП_M$ – настроечные параметры, соответственно для ЦКР₁, ЦКР₂, ..., ЦКР_М; $НП_1 = \{k_{п}^1, k_{и}^1, k_{д}^1\}$, $НП_2 = \{k_{п}^2, k_{и}^2, k_{д}^2\}, \dots, НП_M = \{k_{п}^M, k_{и}^M, k_{д}^M\}$; ЭС – элемент сравнения; утолщенная линия – шина, по которой осуществляется взаимодействие уровней

3.1. Моделирование реакции объекта управления в момент времени $t = (n + 1) \cdot T$ на соответствующее управляющее воздействие: $x^1((n + 1) \cdot T)$ для $U^1(nT)$, $x^2((n + 1) \cdot T)$ для $U^2(nT)$, ..., $x^s((n + 1) \cdot T)$ для $U^s(nT)$.

3.2. Вычисление рассогласований в момент времени $t = (n + 1) \cdot T$: $\Delta x^1((n + 1) \cdot T)$ для $x^1((n + 1) \cdot T)$, $\Delta x^2((n + 1) \cdot T)$ для $x^2((n + 1) \cdot T)$, ..., $\Delta x^s((n + 1) \cdot T)$ для $x^s((n + 1) \cdot T)$.

3.3. Поиск минимального рассогласования:

$$\Delta x^{\min}((n + 1) \cdot T) = \min \left\{ \left| \Delta x^1((n + 1) \cdot T) \right|, \left| \Delta x^2((n + 1) \cdot T) \right|, \dots, \left| \Delta x^s((n + 1) \cdot T) \right| \right\}.$$

3.4. Выбор настроечных параметров для вычисления управляющего воздействия цифрового ПИД-регулятора:

$$\Delta x^{\min}((n + 1) \cdot T) = \left| \Delta x^1((n + 1) \cdot T) \right| \Rightarrow U^1(nT) \Rightarrow k_{п}^1, k_{и}^1, k_{д}^1;$$

$$\Delta x^{\min}((n + 1) \cdot T) = \left| \Delta x^2((n + 1) \cdot T) \right| \Rightarrow U^2(nT) \Rightarrow k_{п}^1, k_{и}^1, k_{д}^2, \dots;$$

$$\Delta x^{\min}((n + 1) \cdot T) = \left| \Delta x^s((n + 1) \cdot T) \right| \Rightarrow U^s(nT) \Rightarrow k_{п}^x, k_{и}^y, k_{д}^z.$$

Алгоритм косвенного управления для классической итерационной модели цифрового ПИД-регулирования

Классическая итерационная формула расчета управляющего воздействия цифрового ПИД-регулятора (формула прямоугольника), предложенная профессором В.И. Мазуровым [3], имеет вид

$$K_0 = k_{п} + k_{и} \cdot T + \frac{k_{д}}{T}, K_{-1} = - \left(k_{п} + \frac{2 \cdot k_{д}}{T} \right), K_{-2} = \frac{k_{д}}{T}, \quad (1)$$

$$U(nT) = U((n - 1) \cdot T) + K_0 \cdot \Delta x(nT) + K_{-1} \cdot \Delta x((n - 1) \cdot T) + K_{-2} \cdot \Delta x((n - 2) \cdot T). \quad (2)$$

В качестве модели объекта управления в алгоритме используем модель токового контура двигателя постоянного тока:

$$x(nT) = \frac{x((n - 1) \cdot T)}{1 + (T \cdot R) / L} + \frac{U((n - 1) \cdot T) \cdot B \cdot T}{L + R \cdot T} + \frac{E \cdot B \cdot T}{L + R \cdot T}, \quad (3)$$

где R – сопротивление обмотки якоря; L – индуктивность цепи якоря; B – коэффициент передачи датчика тока; E – ЭДС самоиндукции.

Алгоритм корректировки настроечных параметров цифровых регуляторов для формулы прямоугольника по предложенной методике косвенного цифрового управления сводится к реализации мероприятий:

1. Задание значений настроечных параметров:

1.1) задание значений коэффициента усиления пропорциональной составляющей, например $k_{\text{п}}^1, k_{\text{п}}^2, k_{\text{п}}^3$;

1.2) задание значений коэффициента усиления интегрирующей составляющей, например $k_{\text{и}}^1, k_{\text{и}}^2, k_{\text{и}}^3$;

1.3) задание значений коэффициента усиления дифференцирующей составляющей, например $k_{\text{д}}^1, k_{\text{д}}^2, k_{\text{д}}^3$.

2. Моделирование по каждой модели ПИД-регулятора значения управляющего воздействия по формулам (1) и (2):

$$K_0^1 = k_{\text{п}}^1 + k_{\text{и}}^1 \cdot T + \frac{k_{\text{д}}^1}{T}, K_{-1}^1 = - \left(k_{\text{п}}^1 + \frac{2 \cdot k_{\text{д}}^1}{T} \right),$$

$$K_{-2}^1 = \frac{k_{\text{д}}^1}{T},$$

$$U^1(nT) = U((n-1) \cdot T) + K_0^1 \cdot \Delta x(nT) +$$

$$+ K_{-1}^1 \cdot \Delta x((n-1) \cdot T) + K_{-2}^1 \cdot \Delta x((n-2) \cdot T);$$

$$K_0^2 = k_{\text{п}}^1 + k_{\text{и}}^1 \cdot T + \frac{k_{\text{д}}^2}{T}, K_{-1}^2 = - \left(k_{\text{п}}^1 + \frac{2 \cdot k_{\text{д}}^2}{T} \right),$$

$$K_{-2}^2 = \frac{k_{\text{д}}^2}{T},$$

$$U^2(nT) = U((n-1) \cdot T) + K_0^2 \cdot \Delta x(nT) +$$

$$+ K_{-1}^2 \cdot \Delta x((n-1) \cdot T) + K_{-2}^2 \cdot \Delta x((n-2) \cdot T); \dots;$$

$$K_0^{27} = k_{\text{п}}^3 + k_{\text{и}}^3 \cdot T + \frac{k_{\text{д}}^3}{T}, K_{-1}^{27} = - \left(k_{\text{п}}^3 + \frac{2 \cdot k_{\text{д}}^3}{T} \right),$$

$$K_{-2}^{27} = \frac{k_{\text{д}}^3}{T},$$

$$U^{27}(nT) = U((n-1) \cdot T) + K_0^{27} \cdot \Delta x(nT) +$$

$$+ K_{-1}^{27} \cdot \Delta x((n-1) \cdot T) + K_{-2}^{27} \cdot \Delta x((n-2) \cdot T).$$

3. Верификация управляющего воздействия и выбор лучшего варианта закона регулирования:

3.1. Моделирование реакции объекта управления в момент времени $t = (n+1) \cdot T$ на соответствующее управляющее воздействие по математической модели (3):

$$x^1((n+1) \cdot T) = \frac{x(nT)}{1+(T \cdot R)/L} + \frac{U^1(nT) \cdot B \cdot T}{L+R \cdot T} + \frac{E \cdot B \cdot T}{L+R \cdot T},$$

$$x^2((n+1) \cdot T) = \frac{x(nT)}{1+(T \cdot R)/L} + \frac{U^2(nT) \cdot B \cdot T}{L+R \cdot T} + \frac{E \cdot B \cdot T}{L+R \cdot T}, \dots,$$

$$x^{27}((n+1) \cdot T) = \frac{x(nT)}{1+(T \cdot R)/L} + \frac{U^{27}(nT) \cdot B \cdot T}{L+R \cdot T} + \frac{E \cdot B \cdot T}{L+R \cdot T}.$$

3.2. Вычисление рассогласований в момент времени $t = (n+1) \cdot T$:

$$\Delta x^1((n+1) \cdot T) = x_0 - x^1((n+1) \cdot T), \Delta x^2((n+1) \cdot T) = x_0 - x^2((n+1) \cdot T), \dots,$$

$$\Delta x^{27}((n+1) \cdot T) = x_0 - x^{27}((n+1) \cdot T).$$

3.3. Поиск минимального рассогласования:

$$\Delta x^{\min}((n+1) \cdot T) = \min \left\{ \left| \Delta x^1((n+1) \cdot T) \right|, \left| \Delta x^2((n+1) \cdot T) \right|, \dots, \left| \Delta x^{27}((n+1) \cdot T) \right| \right\}.$$

3.4. Выбор настроечных параметров для вычисления управляющего воздействия цифрового ПИД-регулятора:

$$\Delta x^{\min}((n+1) \cdot T) = \left| \Delta x^1((n+1) \cdot T) \right| \Rightarrow U^1(nT) \Rightarrow k_{\text{п}}^1, k_{\text{и}}^1, k_{\text{д}}^1;$$

$$\Delta x^{\min}((n+1) \cdot T) = \left| \Delta x^2((n+1) \cdot T) \right| \Rightarrow U^2(nT) \Rightarrow k_{\text{п}}^1, k_{\text{и}}^1, k_{\text{д}}^2, \dots,$$

$$\Delta x^{\min}((n+1) \cdot T) = \left| \Delta x^{27}((n+1) \cdot T) \right| \Rightarrow U^{27}(nT) \Rightarrow k_{\text{п}}^{27}, k_{\text{и}}^{27}, k_{\text{д}}^{27}.$$

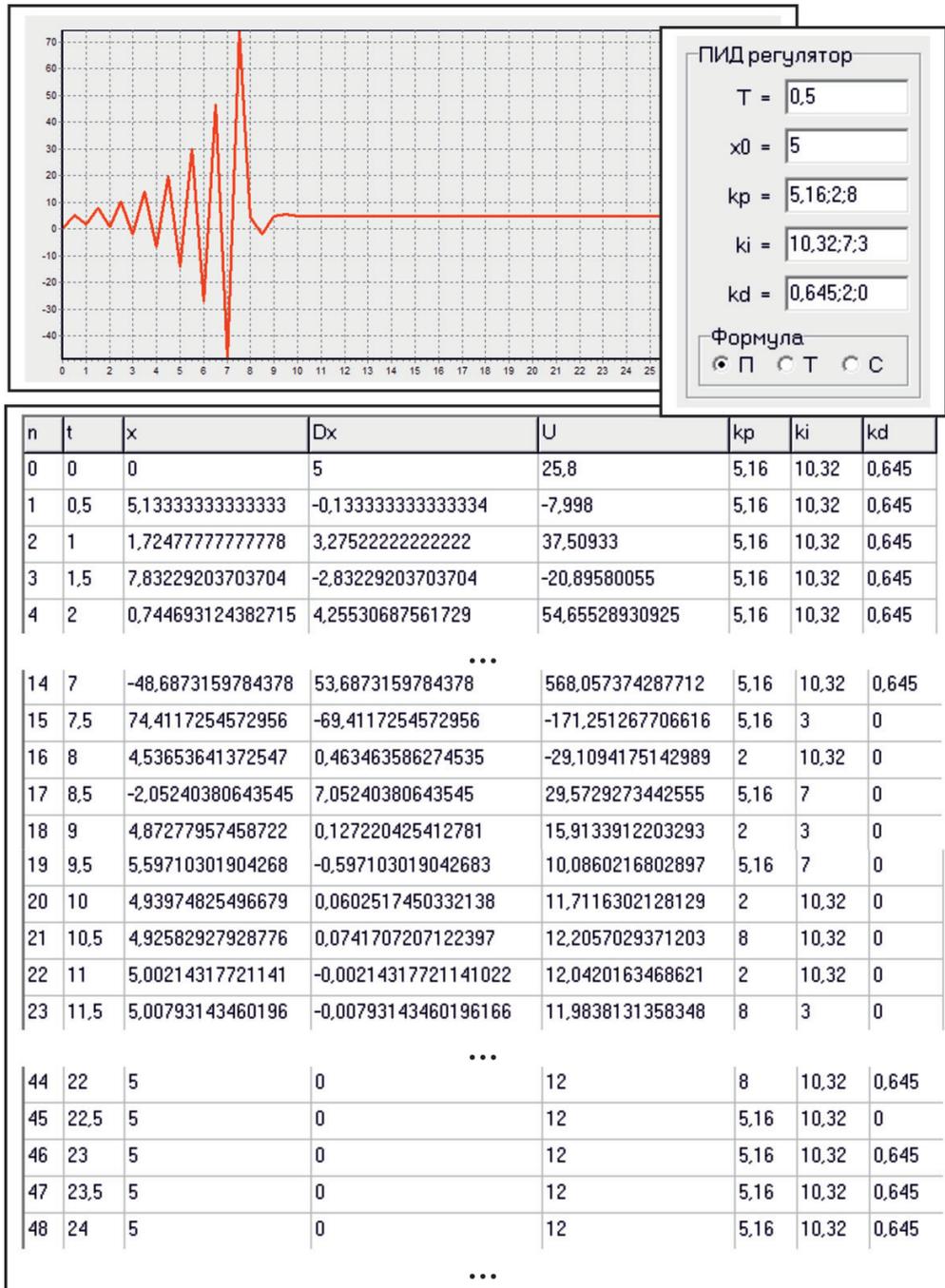


Рис. 3. Моделирование алгоритма косвенного управления для серий настроечных параметров $k_{п1}^1 = 5,16, k_{п2}^2 = 2, k_{п3}^3 = 8, k_{и1}^1 = 10,32, k_{и2}^2 = 7, k_{и3}^3 = 3, k_{д1}^1 = 0,645, k_{д2}^2 = 2, k_{д3}^3 = 2$, модели регулятора (1)–(2) и модели объекта управления (3)

Моделирование предложенного алгоритма косвенного управления для настроечных параметров $k_{п1}^1 = 5,16, k_{п2}^2 = 2, k_{п3}^3 = 8, k_{и1}^1 = 10,32, k_{и2}^2 = 7, k_{и3}^3 = 3, k_{д1}^1 = 0,645, k_{д2}^2 = 2, k_{д3}^3 = 2$ продемонстрировано на рис. 3. Цифровой ПИД регулятор уровня *Input/Output* настроен на настроечные параме-

тры $k_{п1} = 5,16, k_{и1} = 10,32$ и $k_{д1} = 0,645$, рассчитанные методом Зиглера – Николса [5]. Моделирование показывает расходящуюся динамику регулируемого параметра с выбранными настроечными параметрами. Начиная с $t = 7,5$ моделируется захват цифрового ПИД-регулятора промышленным

контроллером уровня *Control* и обработка предложенного алгоритма промышленным контроллером. Начиная с $t = 23$ ПИД-регулятор уровня *Input/Output* обрабатывает требуемую динамику регулируемого параметра на изначально заданных настроечных параметрах в связи с чем происходит отключение косвенного управления (рис. 3).

Выводы

Модельные эксперименты предложенного процесса корректировки настроечных параметров показали продуктивность использования идеи изменения алгоритмов регулирования посредством оперативной корректировки настроечных параметров в процессе регулирования.

Исследование выполнено при поддержке ОГУ имени И.С. Тургенева по теме «Разработка программной системы поддержки процесса управления в предаварийных состояниях для восстановления нормальной работы», приказ № 7-н/26 от 23.10.2013 г.

Список литературы

1. Втюрин В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основы АСУТП. – СПб.: Санкт-Петербургская гос. лесотех. акад., 2006. – 154 с.

2. Захарова О.В. Структурный аспект построения сверхбыстродействующих ПЛК / О.В. Захарова, Н.В. Сен // Информационные системы и технологии. – 2014. – № 5 (85). – С. 14–19.

3. Мазуров В.М. Принципы построения и методы реализации оптимальных и адаптивных регуляторов для объектов с запаздыванием : автореф. дис. докт. техн. наук (05.13.01). – Тула, 1994. – 40 с.

4. Шестихин О.Ф. Автоматизированное управление предприятиями нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / О.Ф. Шестихин, В.С. Красильников, Ю.П. Коптев. – Л.: Химия, 1986. – 200 с.

5. Ziegler J.G. Optimum settings for automatic controllers / J.G. Ziegler, N.B. Nichols // Transactions of the ASME. – 1942. – Vol. 64. – P. 759–768.

References

1. Vtjurin V.A. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija tehnologicheskimi processami. Osnovy ASUTP. SPb.: Sankt-Peterburgskaja gos. lesoteh. akad., 2006. 154 p.

2. Zaharova O.V. Strukturnyj aspekt postroenija sverhbystrodejstvujushhij PLK / O.V. Zaharova, N.V. Sen // Informacionnye sistemy i tehnologii. 2014. no. 5 (85). pp. 14–19.

3. Mazurov V.M. Principy postroenija i metody realizacii optimalnyh i adaptivnyh reguljatorov dlja obektov s zapazdyvanijem: avtoref. dis. dokt. tehn. nauk (05.13.01). Tula, 1994. 40 p.

4. Shestihin O.F. Avtomatizirovannoe upravlenie predpriyatijami neftepererabatyvajushhej i neftehimicheskoj promyshlennosti / O.F. Shestihin, V.S. Krasilnikov, Ju.P. Koptev. L.: Himija, 1986. 200 p.

5. Ziegler J.G. Optimum settings for automatic controllers / J.G. Ziegler, N.B. Nichols // Transactions of the ASME. 1942. Vol. 64. pp. 759–768.