

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ НАСТРОЙКИ КОНТУРОВ ЦИФРОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В.С. Кудряшов, М.В. Алексеев, С.Ю. Китаев

*Кафедра информационных и управляющих систем,
Воронежская государственная технологическая академия*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: автоматизированный синтез настройки; цифровое регулирование; экстрактивная ректификация.

Аннотация: Разработано математическое и программное обеспечение автоматизированной настройки контуров цифрового регулирования непрерывных технологических процессов. Описаны функции пакета программ и этапы синтеза на примере системы цифрового регулирования температуры в колонне экстрактивной ректификации углеводородов.

При разработке и в процессе эксплуатации АСУ ТП требуется проводить параметрирование отдельных контуров регулирования. Для этого в современном программном обеспечении (ПО) промышленных контроллеров и рабочих станций имеются специальные библиотеки для построения моделей объектов регулирования и выбора структур и параметров регуляторов. В тоже время в промышленных пакетах программ не достаточно представлены алгоритмы оптимальной настройки регуляторов по каким-либо критериям и практически нет эффективных методов параметрирования нетиповых цифровых регуляторов [1].

На кафедре информационных и управляющих систем (ИУС) Воронежской государственной технологической академии занимаются проблемой синтеза оптимальных систем цифрового управления технологическими объектами. При этом решаются задачи разработки как типовых систем стабилизации, так и сложных многомерных систем управления с адаптацией параметров [2 – 4].

Достигнута унификация этапов синтеза, что позволяет разрабатывать системы оптимального цифрового управления различных структур при незначительной корректировке программного обеспечения. В частности, при составлении динамической модели объекта, структура связей и динамика отдельных каналов которого определяется в результате предварительных исследований статических и динамических режимов работы, используются дискретные рекуррентные модели:

$$y_i = \sum_{k=1}^n a_k y_{i-k} + b u_{i-1-d}, \quad (1)$$

где i – номер такта T_0 квантования сигналов; u_i, y_i – вход и выход модели; n – порядок модели; a_k, b – параметры; d – целое число тактов запаздывания.

Параметры a_k, b модели (1) определяются численными методами идентификации кривых разгона каналов объекта управления (например, методом наименьших квадратов (МНК)), либо по известным параметрам непрерывных динамических моделей каналов путем дискретизации [3].

Если промышленные объекты достаточно хорошо изучены и построены их непрерывные динамические модели в виде (2) или (3), то для перехода к дискретному описанию получены расчетные формулы (табл. 1).

$$W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{ke^{-\tau s}}{(1+T_1s)(1+T_2s)\dots(1+T_ns)} =$$

$$= \frac{ke^{-\tau s}}{1+T_1^1s+T_2^2s^2+\dots+T_n^n s^n}, \quad (2)$$

$$T_n^n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + T_{n-1}^{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + T_1^1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t-\tau), \quad (3)$$

где u, y – входной и выходной сигналы объекта; k – коэффициент усиления; τ – время чистого запаздывания; s – оператор преобразования Лапласа; T_1, T_2, \dots, T_n – постоянные времени объекта, по которым могут вычисляться коэффициенты $T_1^1, T_2^2, \dots, T_n^n$, например:

при $n=1$ $T_1^1 = T_1$;

при $n=2$ $T_1^1 = T_1 + T_2$, $T_2^2 = T_1 T_2$;

при $n=3$ $T_1^1 = T_1 + T_2 + T_3$, $T_2^2 = T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3$, $T_3^3 = T_1 T_2 T_3$;

при $n=4$ $T_1^1 = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$, $T_2^2 = T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_1 T_4 + T_2 T_3 + T_2 T_4 + T_3 T_4$,

$T_3^3 = T_1 T_2 T_3 + T_1 T_2 T_4 + T_2 T_3 T_4$, $T_4^4 = T_1 T_2 T_3 T_4$.

Таблица 1

Формулы расчета параметров дискретных динамических моделей 1 – 4-го порядков по параметрам непрерывных моделей с заданным тактом квантования T_0

Параметры	Порядок модели			
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$
a_1	$\frac{T_1^1 - T_0}{T_1^1}$	$\frac{2T_2^2 + T_1^1 T_0 - T_0^2}{T_2^2 + T_1^1 T_0}$	$\frac{3T_3^3 + 2T_2^2 T_0 + T_1^1 T_0^2 - T_0^3}{T_3^3 + T_2^2 T_0 + T_1^1 T_0^2}$	$\frac{4T_4^4 + 3T_3^3 T_0 + 2T_2^2 T_0^2 + T_1^1 T_0^3 - T_0^4}{T_4^4 + T_3^3 T_0 + T_2^2 T_0^2 + T_1^1 T_0^3}$
a_2	–	$-\frac{T_2^2}{T_2^2 + T_1^1 T_0}$	$-\frac{3T_3^3 + T_2^2 T_0}{T_3^3 + T_2^2 T_0 + T_1^1 T_0^2}$	$-\frac{6T_4^4 + 3T_3^3 T_0 + T_2^2 T_0^2}{T_4^4 + T_3^3 T_0 + T_2^2 T_0^2 + T_1^1 T_0^3}$
a_3	–	–	$\frac{T_3^3}{T_3^3 + T_2^2 T_0 + T_1^1 T_0^2}$	$\frac{4T_4^4 + T_3^3 T_0}{T_4^4 + T_3^3 T_0 + T_2^2 T_0^2 + T_1^1 T_0^3}$
a_4	–	–	–	$-\frac{T_4^4}{T_4^4 + T_3^3 T_0 + T_2^2 T_0^2 + T_1^1 T_0^3}$
b	$\frac{kT_0}{T_1^1}$	$\frac{kT_0^2}{T_2^2 + T_1^1 T_0}$	$\frac{kT_0^3}{T_3^3 + T_2^2 T_0 + T_1^1 T_0^2}$	$\frac{kT_0^4}{T_4^4 + T_3^3 T_0 + T_2^2 T_0^2 + T_1^1 T_0^3}$
d	τ/T_0	τ/T_0	τ/T_0	τ/T_0

Таким образом выполняется переход от непрерывного описания (3) отдельного канала объекта к разностной рекуррентной форме

$$y_i = a_1 y_{i-1} + a_2 y_{i-2} + \dots + a_n y_{i-n} + b u_{i-d-1}. \quad (4)$$

Если необходимо синтезировать многосвязную систему управления, составляется общее дискретное описание объекта, в котором выходные (управляемые) переменные формируются в виде сумм составляющих по отдельным каналам регулирования и контролируемых возмущений.

На этапе синтеза алгоритмов цифрового управления предлагается использовать дискретную рекуррентную модель цифрового регулятора

$$u_i = r u_{i-1} + \sum_{l=0}^{m-1} q_l e_{i-l}, \quad (5)$$

где e_i , u_i – вход и выход регулятора на i -м такте T_0 ; m – порядок; q_l – настройки; r – коэффициент (при $r = 0$ исключается интегральная составляющая из алгоритма).

Настройки q_l регулятора (5) определяются в составе формируемых структур систем управления с использованием численных методов оптимизации [3] для заданных критериев (например, интегрально-квадратичной ошибки, времени регулирования и т.д.). Анализ исследования систем управления с использованием моделей регуляторов (5) различных порядков показал значительное улучшение показателей качества управления по сравнению с традиционным ПИД-регулятором [3]. Это объясняется отсутствием ограничений на настройки q_l цифрового регулятора (в отличие от непрерывного), который реализуется на средствах вычислительной техники.

В то же время наряду с цифровыми алгоритмами управления, реализуемыми в промышленных контроллерах, на предприятиях продолжают использоваться и традиционные аналоговые регуляторы. Поэтому предусматривается возможность настройки аналоговых регуляторов с помощью разработанного математического обеспечения. Для этого при оптимизации цифровых регуляторов типа ПИД вводятся ограничения на настройки для последующего расчета оптимального непрерывного регулятора. Получены ограничения и формулы перехода от дискретной формы описания к аналоговой (табл. 2). Например, для расчета настроек k_p , $T_{из}$ непрерывного ПИ-регулятора необходимо провести оптимизацию с учетом ограничений (табл. 2) настроек цифрового регулятора 2-го порядка ($m = 2$) с интегральной составляющей

$$u_i = u_{i-1} + q_0 e_i + q_1 e_{i-1}, \quad (6)$$

где q_0 , q_1 – настройки цифрового ПИ-регулятора (в случае соблюдения ограничений: $q_0 > 0$, $q_1 < 0$, $q_0 > |q_1|$) и конструктивных ограничений на настройки непрерывного регулятора).

Для оценки эффективности работы синтезированной системы предусматривается расчет показателей качества регулирования и исследование чувствительности при дрейфе параметров модели объекта.

Разработано ПО для автоматизированного синтеза систем цифрового управления с понятным и удобным интерфейсом. При этом организован многооконный диалоговый режим работы программ с включением графических функций для

Таблица 2

**Формулы расчета настроек типовых непрерывных регуляторов
по настройкам цифровых с заданным тактом квантования T_0**

Тип регулятора	Уравнение типового непрерывного регулятора	Формулы расчета настроек непрерывного регулятора	Ограничения на настройки цифрового регулятора
П	$u(t) = k_p e(t)$	$k_p = q_0$	$q_0 > 0$
И	$u(t) = \frac{1}{T_{из}} \int_0^t e(t) dt$	$T_{из} = \frac{T_0}{q_0}$	$0 < q_0 < 1$
ПД	$u(t) = k_p \left(e(t) + T_{пр} \frac{de(t)}{dt} \right)$	$k_p = q_0 + q_1,$ $T_{пр} = -\frac{q_1}{q_0 + q_1} T_0$	$q_0 > 0, q_1 < 0,$ $q_0 > q_1 $
ПИ	$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_{из}} \int_0^t e(t) dt \right)$	$k_p = q_0,$ $T_{из} = \frac{q_0}{q_0 + q_1} T_0$	$q_0 > 0, q_1 < 0,$ $q_0 > q_1 $
ПИД	$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_{из}} \int_0^t e(t) dt + T_{пр} \frac{de(t)}{dt} \right)$	$k_p = q_0 - q_2,$ $T_{из} = \frac{q_0 - q_2}{q_0 + q_1 + q_2} T_0,$ $T_{пр} = \frac{q_2}{q_0 - q_2} T_0$	$q_0 > 0, q_1 < 0,$ $q_2 > 0, q_1 > q_0,$ $2q_0 + q_1 > 0,$ $q_0 > q_2,$ $q_0 + q_1 + q_2 > 0$

более удобного представления результатов моделирования. Пакет программ позволяет выполнять следующие функции:

- проводить идентификацию дискретных динамических моделей объектов различных порядков по кривым разгона или по известным параметрам непрерывных моделей;
- выбирать структуры регуляторов и параметризовать их вручную или автоматически по одному из предлагаемых критериев оптимизации (интегрально-квадратичная ошибка, время регулирования или перерегулирование);
- исследовать синтезированную модель системы, сравнивая оценки показателей качества, и осуществлять автоматический выбор структур по тем или иным показателям.

Рассмотрим пример автоматизированного параметрирования контура регулирования температуры на нижней контрольной тарелке колонны экстрактивной ректификации изопентан-изоамиленовой фракции расходом теплоносителя в кипятильник колонны [3].

В диалоговом окне меню «Модель объекта» (рис. 1) организуется ввод данных: параметров непрерывной модели объекта T_1, T_2, k, τ , конечного времени моделирования T_k и длительности такта квантования T_0 .

Результатом выполнения этапа идентификации модели являются параметры дискретной динамической модели (рис. 2), полученные путем дискретизации (см. табл. 1).

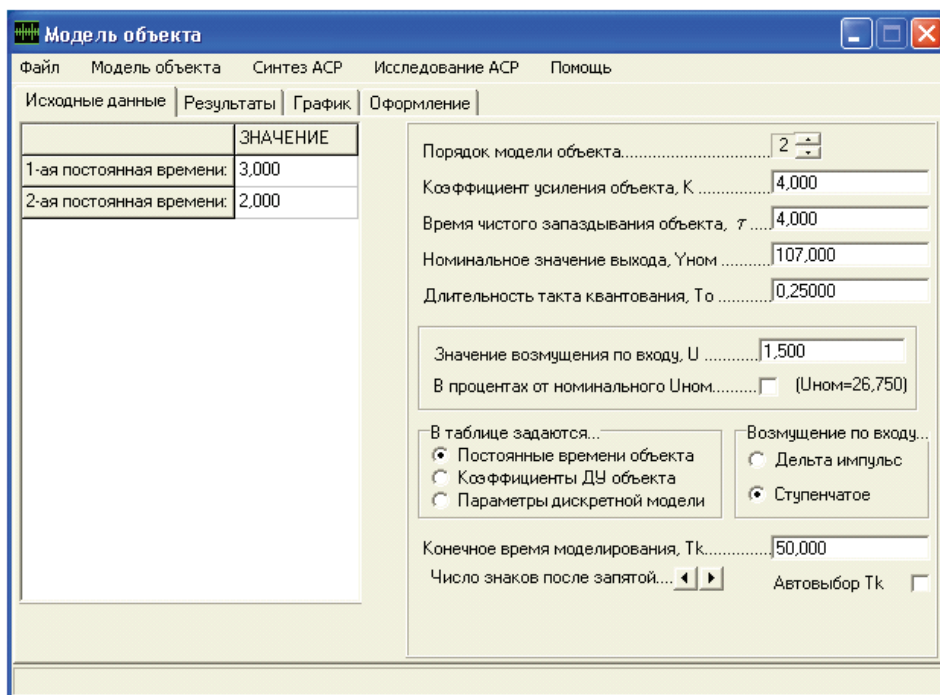


Рис. 1 Диалоговое окно меню «Модель объекта»
(ДУ – дифференциальное уравнение)

```

Результаты расчёта:
Коэффициент усиления объекта, К=4,000000
Целое число тактов запаздывания, d=16
Постоянные времени объекта:
Т1 = 3,000000
Т2 = 2,000000
Коэффициенты ДУ объекта:
Т11 = 5,000000
Т22 = 6,000000
Параметры дискретной динамической модели 2-го порядка:
a1 = 1,818966
a2 = -0,827586
b = 0,034483
Номинальное значение входа объекта, Уном=26,750000

```

Рис. 2 Сохраненный файл результатов в текстовом формате

По дискретной модели строится динамическая характеристика объекта (рис. 3).

Если получена экспериментальная кривая разгона канала «расход теплоносителя – температура на контрольной тарелке», то дискретные значения входа и выхода вводятся в ПО с выбранным тактом квантования. В этом случае задается порядок восстанавливаемой дискретной модели и ее параметры определяются с помощью МНК. Предусмотрена функция автоматического выбора порядка дискретной модели, если он не указан заранее.

На следующем этапе (окно меню «Синтез АСР» (рис. 4)) выбирается критерий оптимизации и структура регулятора, задаются начальные значения настроек, ограничения по управлению и величина задающего воздействия регулятору.

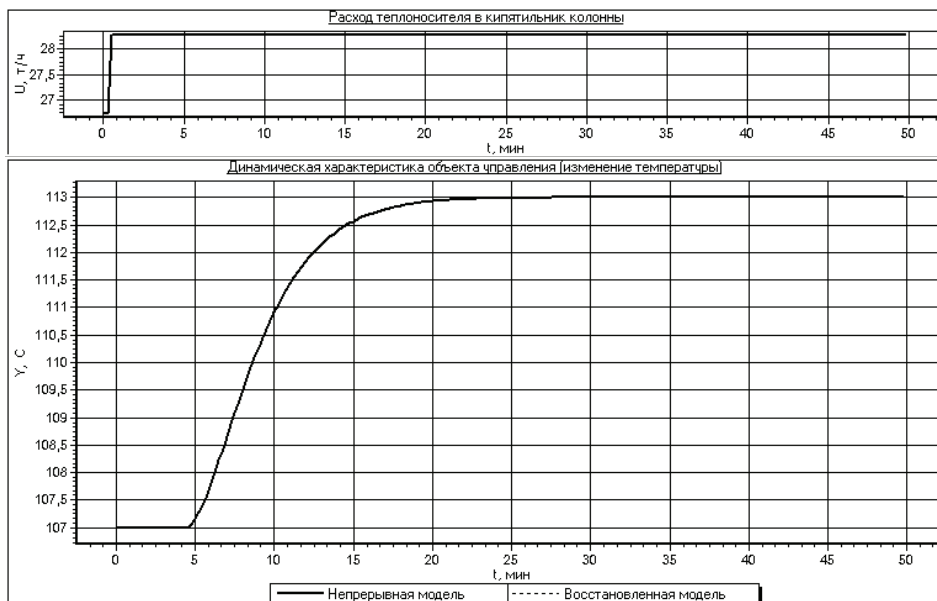


Рис. 3 Динамическая характеристика объекта

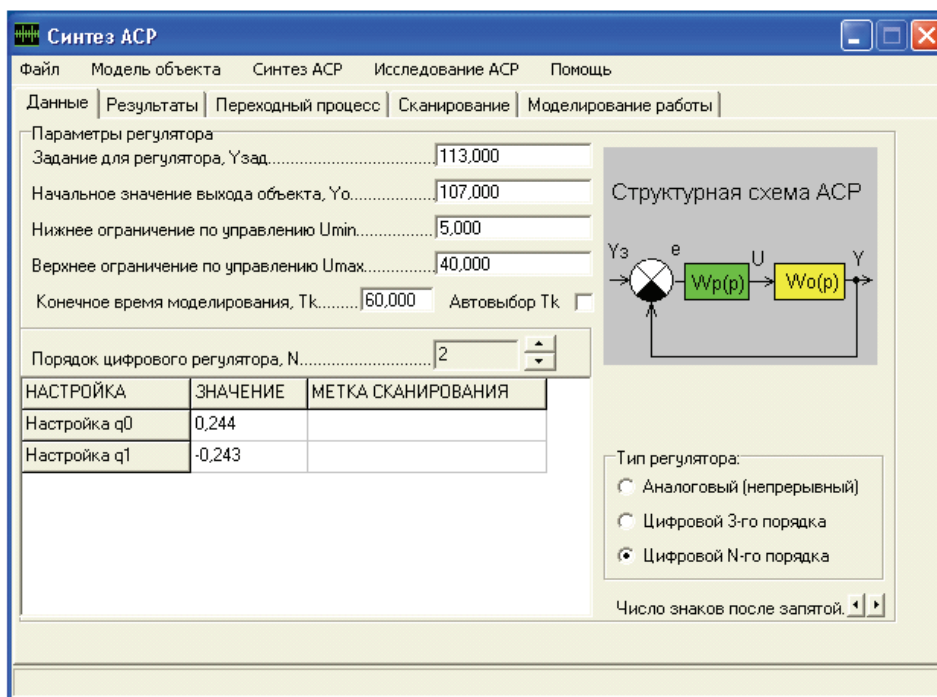


Рис. 4 Диалоговое окно меню «Синтез АСР»

Поиск оптимума критерия выполняется градиентным численным методом [3]. В результате расчета определяются оптимальные настройки выбранного регулятора и строится динамическая характеристика замкнутой системы (рис. 5).

Предварительно можно оценить область выбора начальных настроек регулятора (для определения окрестности глобального оптимума), задав диапазоны их изменения и построив зависимость критерия управления от настроек.

В ПО предусмотрена функция автоматического выбора структуры регулятора по задаваемому критерию качества. При этом необходимо указать диапазон структур (порядков) цифровых регуляторов.

После синтеза оптимальной системы управления выполняется расчет показателей качества и оценивается работа системы в условиях действия контролируемых возмущений на объект (рис. 6).

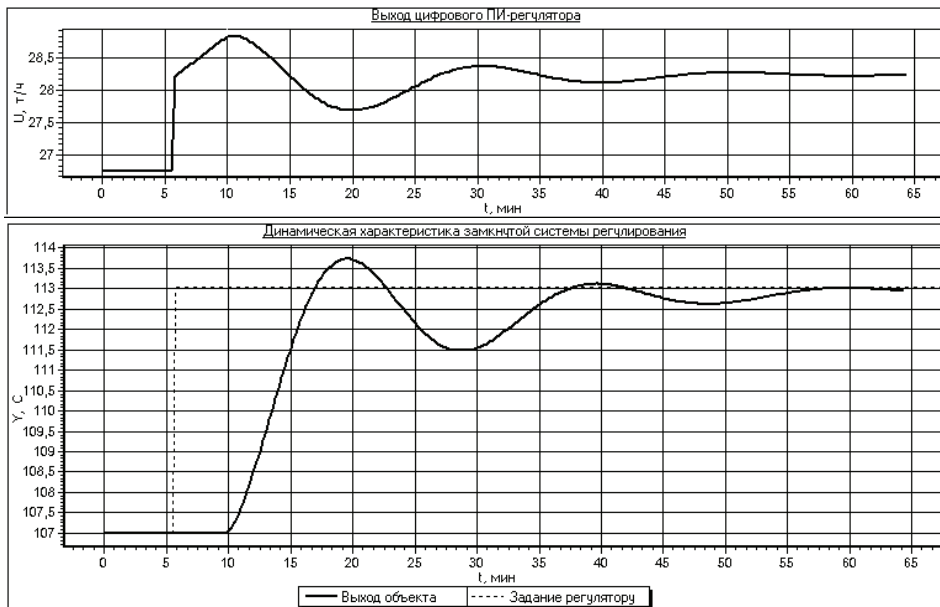


Рис. 5 График изменения управляющего воздействия и выхода объекта в замкнутой системе

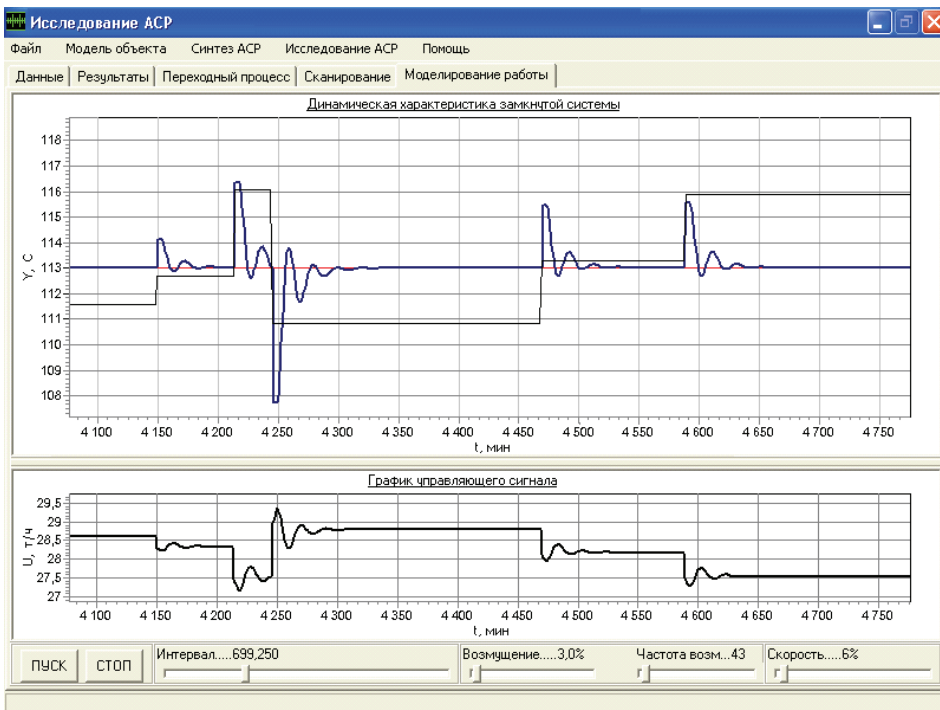


Рис. 6 Диалоговое окно меню «исследование АСР»

Разработанное математическое и программное обеспечение может быть использовано для автоматизированного синтеза алгоритмов цифрового управления различными объектами непрерывного действия.

Список литературы

1. Дрейзин В.Э. Проблемы создания АСУТП на базе современных программно-технических комплексов / В.Э. Дрейзин, П.Н. Ишков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. Москва: Изд-во ООО «Научтехлитиздат», 2002. № 12. С. 1-5.
2. Кудряшов В.С. Пакет программ синтеза систем цифрового управления / В.С. Кудряшов, В.К. Битюков, М.В. Алексеев, С.В. Рязанцев // Труды отраслевой конференции по метрологии и автоматизации в нефтехимической и пищевой промышленности. Воронеж: ВГТА, 2002. С. 87-91.
3. Битюков В.К. Моделирование и синтез систем цифрового управления многомерными технологическими объектами непрерывного действия / В.К. Битюков, В.С. Кудряшов, М.В. Алексеев. Воронеж: ВГТА, 2002. – 143 с.
4. Кудряшов В.С. Синтез адаптивной цифровой связанной системы управления двумерным объектом / В.С. Кудряшов, Н.Р. Бобровников, В.К. Битюков, М.В. Алексеев, С.В. Рязанцев, Ю.Н. Гридин, С.В. Яркин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. Москва: Изд-во ООО «Научтехлитиздат», 2002. № 12. С. 5-11.

Automated Synthesis of Adjusting Boundaries of Digital Control

V.S. Kudryashov, M.V. Alekseev, S.Yu. Kitaev

*Department of Information and Control Systems,
Voronezh State Technological Academy*

Key words and phrases: automated synthesis of adjustment; digital control; extractive rectification.

Abstract: Software for automated adjustment of boundaries of digital control over continuous technological processes is developed. Functions of software packages and synthesis stages are described. It is done on the example of the system of digital temperature regulation in the column of hydrocarbon extractive rectification.

Automatisierte Synthese der Einregulierung der Konturen der Ziffernregelung

Zusammenfassung: Es ist ein Software der automatisierten Einregulierung der Konturen der Ziffernregelung der stetigen technologischen Prozesse entwickelt. Es sind die Funktionen des Programmpaketes und die Etappen der Synthese auf dem Beispiel des Systems der Ziffernregelung der Temperatur in der Kolonne der extraktiven Rektifikation von Kohlenwasserstoffen beschrieben.

Synthèse automatisée de l'ajustement des contours de la régulation numérique

Résumé: Sont élaborés le logiciel et le matériel de l'ajustement des contours de la régulation numérique des processus technologiques continus. Sont décrites les fonctions des logiciels et les étapes de la synthèse à la base du système de la régulation numérique de la température dans une colonne des hydrocarbures extractifs de rectification.