



УДК 681.513.3

© 2020 г. Д.А. Рычков,

А.Ю. Торгашов, д-р техн. наук

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

СИНТЕЗ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассматривается задача параметрического синтеза развязывающих устройств системы управления ректификационной колонной на основе виртуальных анализаторов в условиях неопределенности. Определены оптимальные параметры регуляторов и развязывающих устройств в смысле интегрального квадратичного критерия качества. Разработанная система управления компенсирует взаимное влияние контуров и обеспечивает оптимальное быстродействие.

Ключевые слова: виртуальный анализатор, критерии качества, ПИ-регулятор, система управления, ректификационная колонна, развязывающее устройство, массив относительных коэффициентов усиления, неопределенность, оптимизация.

DOI: 10.22250/isu.2020.65.102-123

Введение

Многосвязные системы управления часто встречаются в промышленности, и в данной работе в качестве объекта рассматривается технологический процесс ректификации. Для ректификационных колонн (РК) возникает проблема повышения качества одного выходного продукта без изменения качества другого продукта. Сложность ее решения обусловлена наличием взаимного влияния контуров регулирования, поэтому существующие подходы к управлению РК связаны с анализом взаимного влияния и его компенсации. В работе [1] представлен способ автоматического управления процессом ректификации путем изменения расхода орошения в зависимости от значения температуры верхней части колонны. Также в работе [1] используется система автоматического управления процессом ректификации путем

изменения расхода орошения в зависимости от температуры и давления верхней части колонны, молекулярного веса нефтепродукта, однако недостатками известных способов являются низкая точность регулирования качества нефтепродукта, невысокое быстродействие процесса управления и неспособность реализации управления системой с несколькими входами и выходами в условиях неопределенности. В работе [2] представлен способ автоматического регулирования процесса ректификации путем задания температурного профиля колонны и изменения подачи теплоносителя и орошения. В зависимости от изменения температурного профиля РК при измерении давления в верхней и нижней частях колонны осуществляется корректировка температурного профиля колонны, определение высоты участка колонны, на котором температура не меньше температуры кипения кубового продукта заданного состава, и высоты участка колонны, на котором температура не превышает температуры кипения дистиллята заданного состава. Также производится расчет скорости изменения температуры по высоте колонны и выполняется корректировка расходов теплоносителя и орошения, однако также недостатком является отсутствие компенсации инерционности процесса ректификации в условиях неопределенности, что приводит к ухудшению качества регулирования.

В настоящей статье рассматривается задача, когда динамика каналов передачи воздействий РК точно неизвестна. Предложена система управления, целью которой является, во-первых, увеличение быстродействия процесса управления качеством путем использования виртуальных анализаторов (ВА) для оценки температуры конца кипения верхнего продукта (ВП) и температуры начала кипения бокового продукта (БП). В ВА поступают показания датчиков температуры, давления на ступенях разделения и расхода сырья, а также результаты лабораторного анализа выходного продукта. В связи с тем, что лабораторный анализ выходного продукта производится с интервалом от 24 часов, управление процессом ректификации основывается на полученной математической модели ВА. Во-вторых, для компенсации взаимного влияния двух контуров управления предложено использование в системе управления блоков развязывающих устройств, учитывающих неопределенность модели динамики РК. Выполняется разработка ВА [3] для параметров температуры конца кипения ВП и начала кипения БП с использованием метода «лассо» [4]. Производится разработка системы управления на основе ПИ-регуляторов с применением развязывающих устройств [5], для системы с двумя входами и двумя выходами на примере производственной ректификационной колонны. При настройке ПИ-регуляторов применяется

несколько методов: метод Кохен-Куна, метод на основе целевой функции, метод на основе внутренней модели [6]. Анализ величины взаимного влияния контуров управления производится при помощи матрицы относительных коэффициентов усиления (RGA) [7]. После синтеза и ввода в систему развязывающих устройств показано, что для рассматриваемой системы скомпенсирована величина взаимного влияния. Для условий, содержащих неопределенность модели процесса, оптимизированы параметры ПИ-регуляторов с целью минимизации величины взаимного влияния и выполнена оптимизация настроечных коэффициентов развязывающих устройств.

Описание объекта управления и постановка задачи

Объект управления представляет собой РК (рис.1) с верхним циркуляционным орошением (ВЦО).

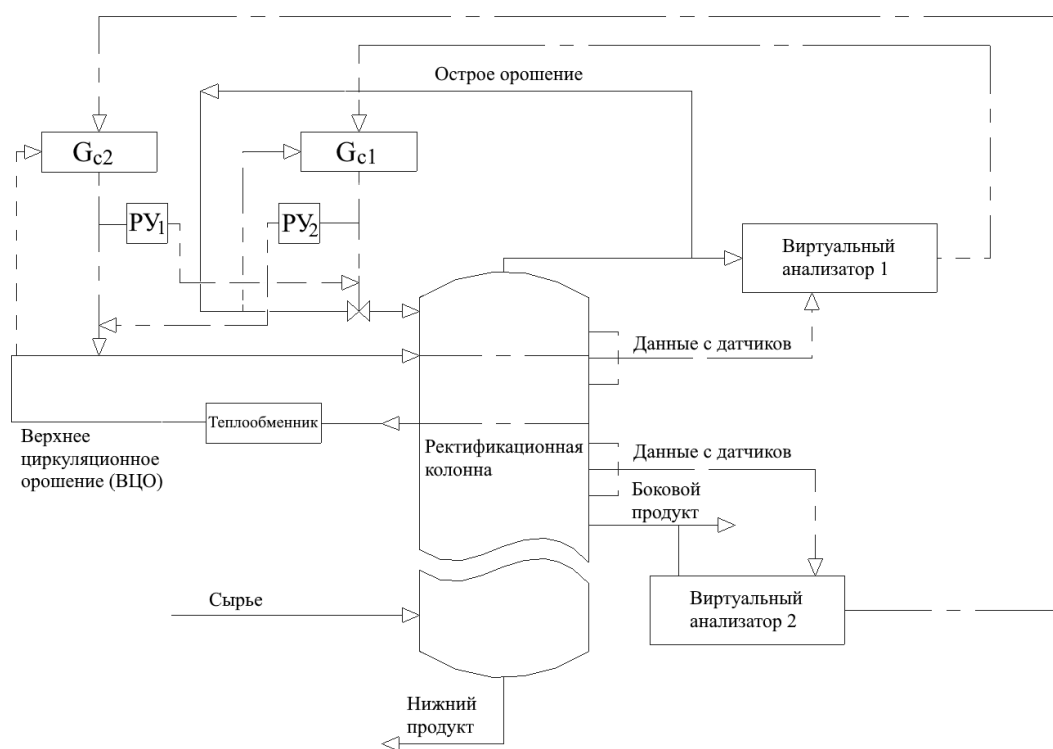


Рис. 1. Конфигурация системы управления ректификационной колонной:
 G_{c1} – ПИ-регулятор величины потока острого орошения; G_{c2} – ПИ-регулятор температуры возврата ВЦО; $РУ_1$, $РУ_2$ – развязывающие устройства.

Информация о температуре выходных продуктов поступает в виртуальные анализаторы 1 и 2. После формирования зависимостей на ПИ-регуляторы G_{c1} и G_{c2} поступает сигнал с заданием. ПИ-регуляторы осуществляют изменения величин потока острого орошения и температуры ВЦО. ПИ-регуляторы описываются уравнениями:

$$W_{Gc1}(s) = P_1 + \frac{T_{i1}}{s}; \quad W_{Gc2}(s) = P_2 + \frac{T_{i2}}{s}.$$

Объект управления имеет два входа и два выхода. Температура конца кипения верхнего продукта регулируется при помощи изменения величины потока острого орошения и температуры возврата верхнего циркуляционного орошения. Аналогично регулируется температура начала кипения бокового продукта, т.е. имеем многосвязный объект управления.

Необходимо сформировать выборки из набора данных с датчиков, установленных на ректификационной колонне, выполнить синтез виртуальных анализаторов для температуры конца кипения верхнего продукта и температуры начала кипения бокового продукта. Для рассматриваемой системы с двумя входами и двумя выходами (рис. 1) требуется осуществить синтез системы управления, содержащей ПИ-регуляторы с развязывающими устройствами на основе виртуальных анализаторов, задача которой заключается в стабилизации значения температуры конца кипения ВП без изменения температуры начала кипения БП.

В условиях неопределенности модели процесса необходимо оптимизировать коэффициенты ПИ-регуляторов, развязывающих устройств для обеспечения снижения величины взаимного влияния контуров и обеспечения минимума интеграла квадрата ошибки регулирования (ISE):

$$ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt = \int_0^{\infty} [y_{spi}(t) - y_i(t)]^2 dt,$$

где $y_{spi}(t)$ – задание на i -й регулятор; $y_i(t)$ – выход i -го контура; $i = 1, 2$.

Обработка промышленных данных и синтез виртуальных анализаторов

Для функционирования системы управления построены модели двух ВА. Температуры конца кипения (Ткк) ВП и температуры начала кипения (Тнк) БП. Для соответствующих лабораторных анализов (выходных переменных) получены данные с датчиков измерений технологических параметров РК. В табл. 1, 2 представлены входные переменные виртуальных анализаторов соответственно 1 и 2.

Таблица 1

№	Описание
1.	Давление паров в контактной зоне колонны
2.	Расход сырья
3.	Расход верхнего продукта
4.	Расход ВЦО
5.	Температура блока охлаждения
6.	Температура теплообменника в потоке ВЦО
7.	Температура верхней части вспомогательной колонны
8.	Температура холодильника в потоке циркуляционного орошения вспомогательной колонны

№	Описание
1.	Давление паров верхней части колонны
2.	Расход сырья
3.	Температура теплообменника в потоке ВЦО

В качестве критериев точности ВА приняты:

1) квадратный корень из среднеквадратической ошибки [8] (RMSE)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}},$$

где y_i – измеряемое значение выходной переменной; \hat{y}_i – ее значение, полученное на основе ВА; n – количество измерений выхода;

2) коэффициент детерминации [9] R^2 (КД)

$$R^2 = 1 - \frac{\text{RMSE}^2}{M_y},$$

$$M_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2.$$

Для построения ВА использован метод «лассо» – метод оценивания коэффициентов линейной регрессионной модели. Метод заключается во введении ограничения на сумму абсолютных значений коэффициентов модели, что приводит к обращению в нуль некоторых из этих коэффициентов. Ненулевые коэффициенты соответствуют признакам, входящим в модель [4].

Используется линейная модель вида

$$y = X\beta + \varepsilon,$$

где X – матрица значений входных переменных; $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)^T$ – регрессионные коэффициенты; ε – случайная ошибка. Согласно методу «лассо», вектор β выбирается при ограничении суммы модулей регрессионных коэффициентов

$$T(\beta) = \sum_{j=1}^m |\beta_j| \leq \lambda,$$

где $\lambda \geq 0$ – регуляризации. Чем меньше λ , тем большее число коэффициентов β_j принимают нулевое значение. Под регуляризацией здесь понимается общий метод, заключающийся в наложении дополнительных ограничений на искомые параметры, которые могут предотвратить излишнюю сложность и переобучение модели. Таким образом, при значении параметра регуляризации $\lambda = 0$, метод “лассо” сводится к методу наименьших квадратов, а при увеличении λ модель становится зависимой от меньшего числа коэффициентов, пока не превратится в нуль-модель. Оптимальной величине λ соответствует минимальная ошибка прогноза в наблюдениях, не участвовавших

в построении модели. Таким образом, достигается компромисс между количеством входных переменных и ошибкой регрессии. В ходе минимизации некоторые коэффициенты становятся нулевыми, что и определяет отбор наиболее информативных переменных. Условие минимизации квадратов ошибки параметров $\hat{\beta}$ выражается формулой:

$$\hat{\beta} = \arg \min(\sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^m \beta_j x_{ij})^2 + \lambda \|\beta\|),$$

где λ – коэффициент регуляризации.

В табл. 3 и 4 представлены результаты исследования зависимости коэффициента детерминации от коэффициента регуляризации соответственно для верхнего и бокового продуктов.

Таблица 3

λ	Обучающая выборка		Проверочная выборка	
	КД	RMSE	КД	RMSE
0	0,8543	1,8011	0	2,8959
0,1	0,7892	2,1665	0,227	2,0603
0,2	0,7704	2,2613	0,44	1,7535
0,3	0,7585	2,3191	0,4634	1,7166
0,4	0,7492	2,3631	0,4482	1,7406
0,5	0,7417	2,3981	0,4466	1,7433
0,6	0,7327	2,4399	0,4418	1,7507
0,7	0,7219	2,4884	0,4337	1,7634
0,8	0,7101	2,5409	0,4214	1,7825
0,9	0,6978	2,5943	0,4082	1,8027
1	0,6855	2,6463	0,4032	1,8103

Таблица 4

λ	Обучающая выборка		Проверочная выборка	
	КД	RMSE	КД	RMSE
0	0,8842	4,6077	0	7,4801
0,1	0,886	4,9554	0,2058	5,7324
0,2	0,8574	5,1129	0,24	5,6074
0,3	0,8469	5,2968	0,2516	5,5646
0,4	0,8396	5,4219	0,2821	5,4502
0,5	0,8335	5,5237	0,2986	5,3868
0,6	0,8275	5,6219	0,3017	5,3749
0,7	0,8222	5,7076	0,2973	5,3918
0,8	0,8176	5,782	0,2901	5,4195
0,9	0,8132	5,8511	0,2819	5,4507
1	0,8085	5,9242	0,2701	5,4952

При использовании метода «лассо» для выборки по верхнему продукту максимальный КД является 0.7585 для обучающей выборки и 0.4634 – для

проверочной. Данное значение достигается при коэффициенте регуляризации $\lambda = 0.3$ (рис. 2).

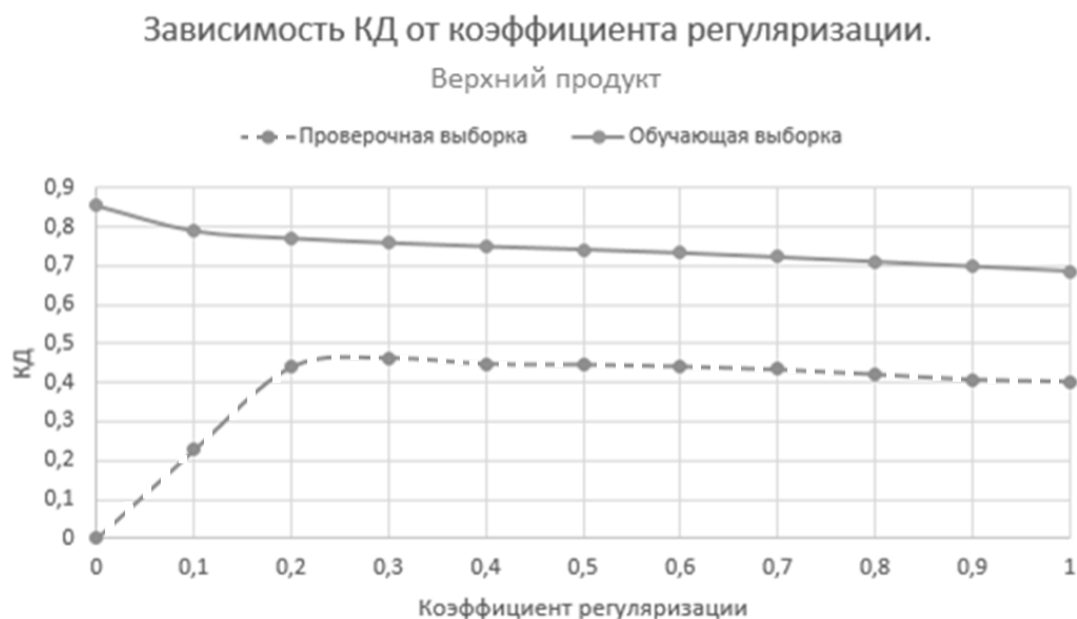


Рис. 2. График зависимости КД от коэффициента регуляризации (температуры конца кипения верхнего продукта).

При использовании метода «лассо» для выборки по боковому продукту максимальный КД является 0.8275 для обучающей выборки и 0.3017 – для проверочной. Данное значение достигается при коэффициенте регуляризации $\lambda = 0.6$ (рис. 3).

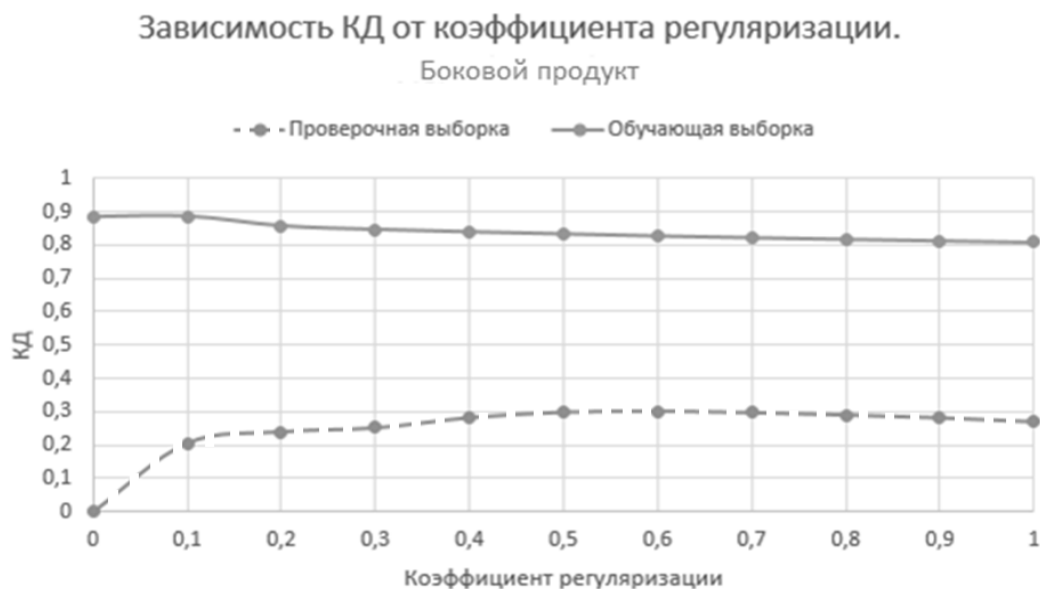


Рис. 3. График зависимости КД от коэффициента регуляризации (температура начала кипения бокового продукта).

После обработки результатов промышленных данных полученная передаточная матрица (ПМ) G объекта управления, связывающая ВА и управляющие воздействия, имеет вид:

	Величина потока острого орошения	Температура возврата ВЦО
ВА Ткк ВП	$-0.7 \frac{1}{14s + 1} e^{-3s}$	$0.015 \frac{1}{20s + 1} e^{-8s}$
ВА Тнк БП	$-0.2 \frac{1}{15s + 1} e^{-14s}$	$0.907 \frac{1}{7.56s + 1} e^{-5s}$

Настройка ПИ-регуляторов децентрализованной системы управления

Структурная схема децентрализованной системы управления для рассматриваемого объекта показана на рис. 4, где G_{c1} , G_{c2} – ПИ-регуляторы; y_{sp1} , y_{sp2} – задания регуляторам; y_1 , y_2 – выходы.

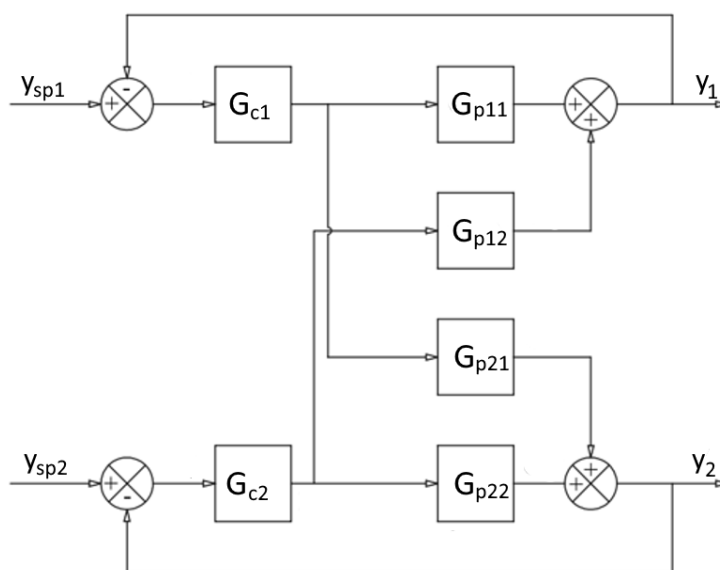


Рис. 4. Структурная схема системы управления с ПИ-регуляторами.

Настройка ПИ-регуляторов для двух отдельных контуров управления без взаимного влияния выполняется несколькими методами (метод Кохен – Куна, метод на основе целевой функции, метод на основе внутренней модели – ИМС) [6].

В табл. 5 и 6 представлены параметры настройки ПИ-регуляторов температуры соответственно для конца кипения верхнего и начала кипения бокового продуктов, а также величина интеграла квадратичной ошибки (ISE).

Таблица 5

Метод	P_1	T_{i1}	ISE
Cohen-Coon	-6,1190	415,164	418,1
Метод на основе целевой функции	-5,1455	851,44	441,5
ИМС	-1	840	1346

Таблица 6

Метод	P_2	T_{12}	ISE
Cohen-Coon	1,5922	431,682	627,5
Метод на основе целевой функции	1,5151	536,25	691,5
IMC	0,4747	453,6	1149

Из этих таблиц видно, что наименьшее значение критерия интеграла квадрата ошибки имеет ПИ-регулятор настроенный методом Кохен – Куна, но переходный процесс имеет перерегулирование, наличие которого неприемлемо в химической промышленности. Из методов настройки, представленных выше, при которых переходный процесс не имеет перерегулирования, наиболее быстро достигается заданное значение при настройке ПИ-регулятора на основе внутренней модели (IMC).

Анализ взаимного влияния контуров регулирования

RGA (Relative Gain Array) – массив относительных коэффициентов усиления, который дает представление о том, какие пары входов/выходов имеют наибольшее влияние друг на друга. [7].

Для системы вида с двумя входами и двумя выходами матрица передаточных коэффициентов имеет вид:

$$G^\infty = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.7 & 0.015 \\ -0.2 & 0.907 \end{pmatrix},$$

для которой RGA

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{pmatrix},$$

$$\lambda_{ij} = \frac{\text{Передаточный коэффициент выхода } i \text{ от входа } j \text{ в разомкнутом контуре (другие входы const)}}{\text{Передаточный коэффициент выхода } i \text{ от входа } j \text{ в замкнутом контуре (другие выходы const)}}.$$

Первый элемент матрицы RGA равен:

$$\lambda_{11} = \frac{g_{11}}{g_{11} - \frac{g_{12}g_{21}}{g_{22}}} = \frac{1}{1 - \frac{g_{12}g_{21}}{g_{11}g_{22}}} = \frac{1}{1 - \frac{0.015 \times (-0.2)}{(-0.7) \times 0.907}} = 1.0047.$$

В случае квадратной матрицы RGA для нахождения остальных элементов матрицы использованы два правила:

сумма значений строки должна быть равна 1;

сумма значений столбца должна быть равна 1.

Исходя из этого, матрица RGA получает вид

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & 1 - \lambda_{11} \\ 1 - \lambda_{11} & \lambda_{11} \end{pmatrix},$$

а для рассматриваемого случая она будет следующей:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 1.0047 & -0.0047 \\ -0.0047 & 1.0047 \end{pmatrix}.$$

Недиагональные элементы RGA не равны нулю, – значит изменение величины выходной переменной в контуре бокового продукта (y_2) вызывает отклонение в контуре верхнего продукта (y_1), значение задания на котором остается нулевым. Для корректной работы системы управления необходимо минимизировать влияние каналов друг на друга.

Синтез структуры развязывающих устройств

Принцип развязывающих устройств заключается в использовании дополнительных звеньев, которые должны компенсировать влияние входа одного контура на другой. В идеале управление с развязывающими устройствами оказывает влияние только на выбранные переменные. В системах управления с развязывающими устройствами влияние на параллельный контур и корректирующее воздействие формируется с упреждением [5]. Система управления с развязывающими устройствами представлена на рис. 5, где D_{21} , D_{12} – развязывающие устройства.

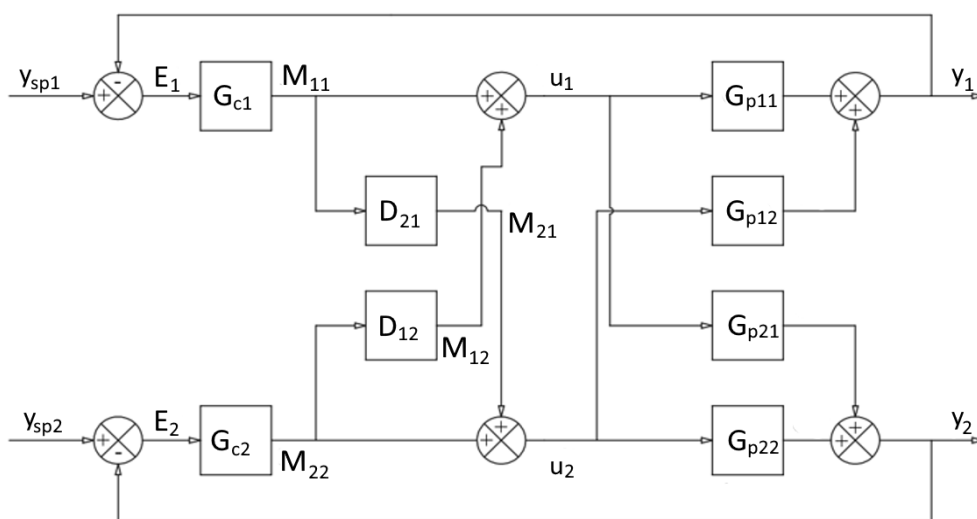


Рис. 5. Структурная схема системы управления с развязывающими устройствами.

Развязывающее устройство D_{21} предназначено компенсировать влияние первого входа (величина потока орошения) на второй выход (y_2). По условию развязывания такой компенсации соответствует выражение:

$$G_{p21}M_{11} + G_{p22}M_{21} = 0.$$

В результате заменены $M_{21} = D_{21}M_{11}$, получаем:

$$(G_{p21} + G_{p22}D_{21})M_{11} = 0. \quad (1)$$

Соответственно выражение (1) будет равно нулю, когда один из множителей будет нулевым.

Пусть $G_{p21} + G_{p22}D_{21} = 0$, тогда D_{21} будет иметь вид:

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{p21}(s)}{G_{p22}(s)}.$$

Развязывающее устройство D_{12} предназначено компенсировать влияние второго управляющего воздействия (температура возврата ВЦО) на первый выход (y_1). Найдем его выражение по аналогии:

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{p12}(s)}{G_{p11}(s)}.$$

Перед реализацией системы управления проведено исследование компенсации возмущающих воздействий для контуров регулирования отдельно для проверки принципа функционирования развязывающих устройств:

$$D_{12}(s) = -\frac{\frac{0.015e^{-8s}}{20s+1}}{\frac{-0.7e^{-3s}}{14s+1}} = \frac{0.015e^{-8s}}{20s+1} \times \frac{14s+1}{0.7e^{-3s}} = \frac{0.21s+0.015}{14s+0.7} e^{-5s};$$

$$D_{21}(s) = -\frac{\frac{-0.2e^{-14s}}{15s+1}}{\frac{0.907e^{-5s}}{7.56s+1}} = \frac{0.2e^{-14s}}{15s+1} \times \frac{7.56s+1}{0.907e^{-5s}} = \frac{1.512s+0.2}{13.605s+0.907} e^{-9s}.$$

С децентрализованной системой управления невозможно выполнить эту задачу управления, так как взаимное влияние контуров управления вызывает отклонения в контуре управления выходной переменной y_1 .

Модель объекта со структурной неопределенностью

В промышленных условиях динамическая модель может только примерно описывать работу реальной РК. Принимая во внимание влияние стохастических возмущений на процесс работы колонны, ошибку линейной модели можно сопоставить с реальным процессом. Для описания реального процесса вводится некоторая модель отклонения выхода от промышленного объекта. Такое отклонение может быть формализовано при помощи структурной неопределенности [10].

Наиболее частыми источниками неопределенностей для ректификационной колонны являются погрешности измерений, неизвестное запаздывание, ошибки в высокочастотной динамике при моделировании и нелиней-

ность процесса. Все эти источники можно классифицировать и выделить две основные группы:

неопределенность входных переменных, обусловленная погрешностью измерений;

неопределенность модели, вследствие нелинейности.

В рассматриваемом объекте имеет место неопределенность модели, которая возникает вследствие нелинейности. Нелинейность ректификационной колонны может наблюдаться в полученных переходных процессах реакции на единичное воздействие. В большинстве случаев структурная неопределенность модели вызвана неполнотой знания аналитической структуры уравнений (физико-химические принципы) модели объекта управления. Аффинная неопределенность может часто использоваться для данных случаев, и аффинное семейство полиномов задается как:

$$G^*(s, \Delta) = \{G(s, \delta) = G_0(s) + \dots + \delta_i G_i(s) + \dots + \delta_j G_j(s), \delta \in \Delta\},$$

где Δ – интервал неопределенности; $G_i(s), i = 0, \dots, j$; – фиксированы и известны ($G(s, 0) = G_0(s)$ также называют номинальным полиномом семейства), в этом случае коэффициенты $g_i(\delta)$ полинома $G_i(s, \delta)$ зависят аффинным образом, т.е. $g_i(\delta) = g_i^0 + \sum_{j=1}^n \delta_j g_i^j$, где g_i^j – коэффициент полинома $G_i(s, \delta)$.

Иными словами, коэффициенты $g_i(\delta)$ не могут меняться независимо друг от друга при изменении δ . В данном случае уравнение входа-выхода при аффинной неопределенности имеет вид

$$\begin{pmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{pmatrix} = \left(\begin{pmatrix} G_{p11}(s) & G_{p12}(s) \\ G_{p21}(s) & G_{p22}(s) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta_1 G_{p11}(s) & \delta_1 G_{p12}(s) \\ \delta_1 G_{p21}(s) & \delta_1 G_{p22}(s) \end{pmatrix} \right) \times \begin{pmatrix} u_1(s) \\ u_1(s) \end{pmatrix}$$

или в матричной форме записи

$$Y(s) = ((G(s) + \delta G(s)) \times U(s),$$

где $Y(s)$, $U(s)$ – выходной и входной сигналы; $G(s)$ – передаточная матрица номинальной системы; $\delta G(s)$ – передаточная матрица немоделируемой динамики.

Компенсация взаимного влияния в модели со структурной неопределенностью

Для реализации компенсации для системы с двумя входами и двумя выходами сначала требуется провести исследование условий компенсации для каждого контура отдельно (рис. 6 и 7).

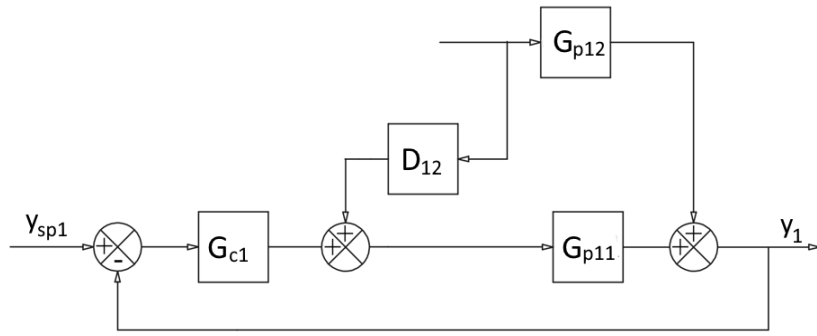


Рис. 6. Структурная схема контура по выходной переменной y_1 с влиянием от контура по выходной переменной y_2 и компенсацией без учета неопределенности.

Для данного контура управления синтезирован компенсатор

$$D_{12}(s) = \frac{0.21s + 0.015}{14s + 0.7} e^{-5s}.$$

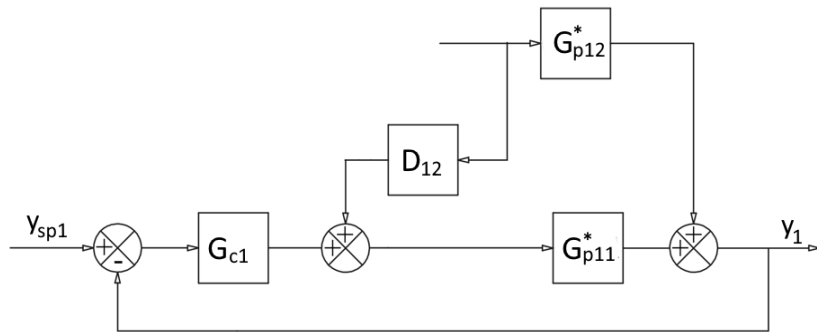


Рис. 7. Структурная схема контура по выходной переменной y_1 с влиянием от контура по выходной переменной y_2 с учетом неопределенности.

$G_{p12}^* = (G_{p12} + \delta_2 G_{p12})$, где $\delta_2 G_{p12}$ – передаточная функция не моделируемой динамики.

Для исследования сформирован набор передаточных функций с неопределенностью с величиной отклонения δ_1 и δ_2 от -0.3 до 0.3 .

В итоге получена передаточная матрица контура управления выходной переменной y_1 с возмущающим воздействием:

$$G_{y_1}^* = \begin{pmatrix} G_{p11} + \delta_1 G_{p11} & G_{p12} + \delta_2 G_{p12} \end{pmatrix};$$

$$G_{y_1}^* = \begin{pmatrix} -0.7 \frac{1}{14s+1} e^{-3s} - 0.7\delta_1 \frac{1}{14s+1} e^{-3s} & 0.015 \frac{1}{20s+1} e^{-8s} + 0.015\delta_2 \frac{1}{20s+1} e^{-8s} \end{pmatrix},$$

где $\delta_1 = 0.3$, $\delta_2 = -0.3$.

Применение компенсатора в данном случае позволяет снизить величину возмущающего воздействия, вызванного взаимовлиянием контуров.

Данные о зависимостях интеграла квадратичной ошибки от величин P_1 и T_{i1} (при $P_1 = -7$) для коэффициента ПИ-регулятора G_{c1} , представлены соответственно в табл. 7 и 8.

Таблица 7

	[±0-0.1]	[±0.1-0.2]	[±0.2-0.3]
P_1	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)
-0,5	2085	2385	2848
-1	1338	1427	1580
-2	940	955	993
-3	791	791	803
-4	710	705	709
-5	659	653	654
-6	624	619	620
-7	600	596	602
-8	583	587	683
-8,2	581	589	1224
-8,5	579	605	2740
-9	582	2395	ISE → ∞
-9,5	681	ISE → ∞	ISE → ∞
-9,8	1977	ISE → ∞	ISE → ∞

Таблица 8

	[±0.1]	[±0.1-0.2]	[±0.2-0.3]
T_{i1}	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)
240	1500	ISE → ∞	ISE → ∞
340	493	1035	ISE → ∞
440	416	441	721
540	446	451	500
640	493	492	511
740	545	542	552
840	600	596	602
940	656	652	656
1040	714	709	712
1140	772	766	769
1240	830	824	827
1340	889	883	886
1440	948	943	946
1540	1007	1002	1005
1640	1067	1063	1065

На рис. 8 и 9 представлены графики зависимости интеграла квадратичной ошибки от величины P_1 и T_{i1} коэффициентов ПИ-регулятора.

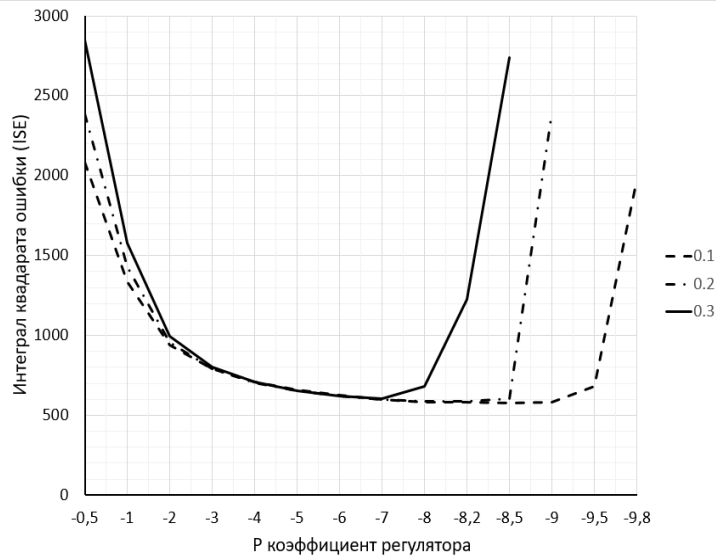


Рис. 8. График зависимости интеграла квадратичной ошибки от величины P_1 коэффициента ПИ-регулятора для контура по u_1 .

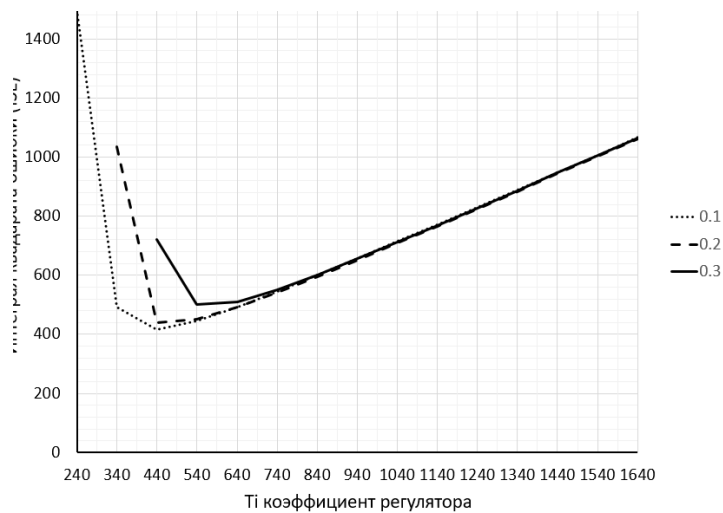


Рис. 9. График зависимости интеграла квадратичной ошибки от величины T_{i1} коэффициента ПИ-регулятора для контура по u_1 .

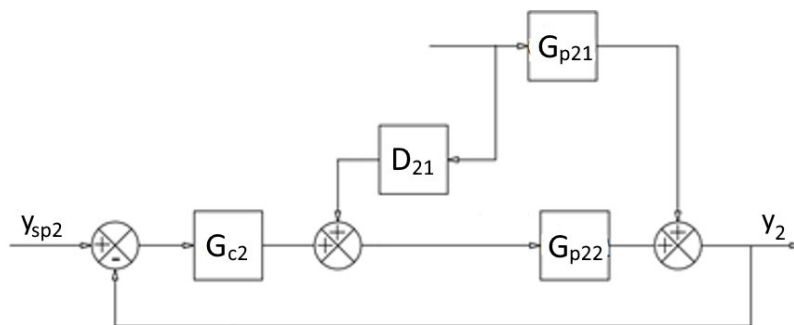


Рис.10. Структурная схема контура управления выходной переменной u_2 с влиянием контура управления от выходной переменной u_1 и компенсацией (без учета неопределенности).

Для данного контура управления синтезирован компенсатор:

$$D_{21}(s) = \frac{1.512s + 0.2}{13.605s + 0.907} e^{-9s}.$$

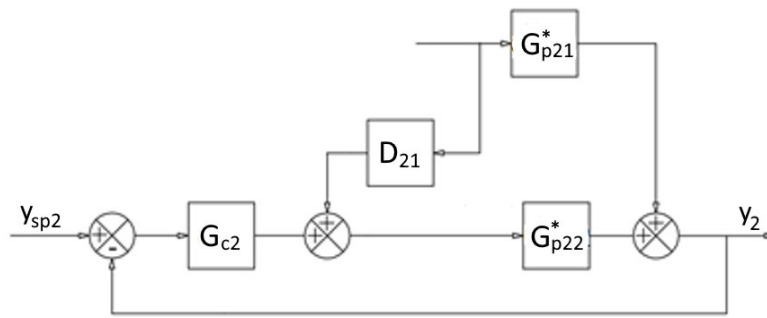


Рис. 11. Структурная схема контура управления выходной переменной y_2 с влиянием от контура управления выходной переменной y_1 и компенсацией (с учетом неопределенности).

$G_{p21}^* = (G_{p21} + \delta_2 G_{p21})$, где $\delta_2 G_{p21}$ – передаточная функция немоделируемой динамики.

Для исследования сформированы набор передаточных функций с неопределенностью с величиной отклонения -0.3 до 0.3 .

В итоге получена передаточная матрица второго контура управления с возмущающим воздействием:

$$G_{y_2}^* = \begin{pmatrix} -0.2 \frac{1}{15s+1} e^{-14s} - 0.2\delta_1 \frac{1}{15s+1} e^{-14s} & 0.907 \frac{1}{7.56s+1} e^{-5s} + 0.907\delta_2 \frac{1}{7.56s+1} e^{-5s} \end{pmatrix},$$

где $\delta_1 = 0.3$, $\delta_2 = -0.3$.

Данные о зависимостях интеграла квадратичной ошибки от величин P_2 и T_{i2} (при $P_2 = 1,4$) для коэффициента ПИ-регулятора G_{c2} , представлены соответственно в табл. 9 и 10.

Таблица 9

	[±0.1]	[±0.1-0.2]	[±0.2-0.3]
P_2	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)
0,6	926	947	997
0,8	807	817	847
1	733	738	759
1,2	683	687	705
1,4	649	654	675
1,6	627	639	678
1,8	620	658	793
1,9	625	699	1014
2	642	799	1850
2,1	681	1084	ISE → ∞

	[±0.1]	[±0.1-0.2]	[±0.2-0.3]
T_{i2}	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)	Интеграл квадратичной ошибки (ISE)
250	1117	1759	2103
<u>350</u>	<u>636</u>	<u>662</u>	<u>712</u>
450	649	654	675
550	704	705	720
650	775	774	788
750	852	850	864
850	932	929	944
950	1013	1010	1026
1050	1094	1090	1106

На рис. 12 и 13 даны графики зависимости интеграла квадратичной ошибки соответственно от величин P_2 и T_{i2} коэффициента ПИ-регулятора G_{c2} .

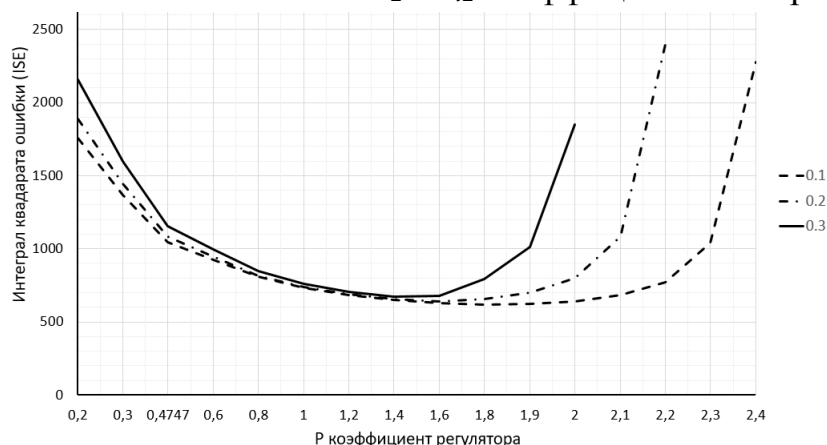


Рис. 12. График зависимости интеграла квадратичной ошибки от величины P_2 коэффициента ПИ-регулятора G_{c2} для контура по y_2 .

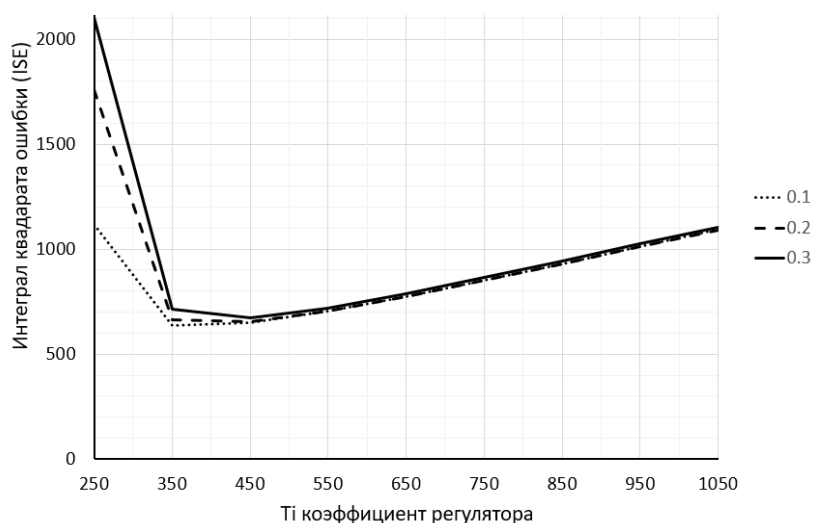


Рис. 13. График зависимости интеграла квадратичной ошибки от величины T_{i2} коэффициента ПИ-регулятора G_{c2} для контура по y_2 .

Оптимизация параметров развязывающих устройств в условиях неопределенности

Для снижения интеграла квадратичной ошибки для каждого контура проведена оптимизация параметров развязывающих устройств в условиях неопределенности.

С этой целью в структурную схему каждого контура (в канал с развязывающими устройствами) введены настроечные коэффициенты K_{dec1} и K_{dec2} .

Таким образом, передаточные функции оптимизированных развязывающих устройств будут выглядеть следующим образом:

$$D_{21}^*(s) = K_{dec1} D_{21}(s) = K_{dec1} \frac{0.21s + 0.015}{14s + 0.7} e^{-5s};$$

$$D_{12}^*(s) = K_{dec2} D_{12}(s) = K_{dec2} \frac{1.512s + 0.2}{13.605s + 0.907} e^{-9s}.$$

В табл. 11 и 12 представлены данные зависимости величины интеграла квадратичной ошибки от значений настроечных коэффициентов соответственно K_{dec1} и K_{dec2} для развязывающих устройств D_{21}^* и D_{12}^* .

Таблица 11

	[±0.1]	[±0.1-0.2]	[±0.2-0.3]
K_{dec1}	ISE	ISE	ISE
0	491,1	482,2	490
0,1	480,3	471	477,9
0,2	470,9	461,7	468,8
0,3	462,9	451,4	462,4
0,4	456,3	448,4	459
0,5	451,1	444,4	458,6
0,6	447,3	442,3	461,1
0,7	444,9	441,9	466,4
<u>0,8</u>	<u>444</u>	<u>443,4</u>	<u>474,9</u>
0,9	444,4	446,7	486
1	446	451	500
1,1	449,5	458,6	517,5
1,2	454,2	467,3	537,6
1,3	460,2	477,8	560,6
1,4	467,7	490	586,5
1,5	476,6	504,1	615,3
1,6	486,9	520	647,1
1,7	498,6	537,7	681,8
1,8	511,7	557,2	719,2

Таблица 12

	[±0.1]	[±0.1-0.2]	[±0.2-0.3]
K_{dec2}	ISE	ISE	ISE
0	771,4	751,2	762,4
0,1	738,6	719,7	729,8
0,2	710	693,2	703,3
0,3	685,8	671,8	683
0,4	665,8	655,3	668,8
0,5	650,1	643,9	660,7
0,6	638,8	637,5	658,8
0,7	631,7	636,2	663
0,8	628,9	639,9	673,3
0,9	630,4	648,5	689,7
1	636	662	712
1,1	646,3	681	740,9
1,2	660,7	704,8	775,7
1,3	679,3	733,5	816,7
1,4	702,3	767,4	863,7
1,5	729,3	806,2	916,9
1,6	761,1	850	976,2
1,7	797	899	1042
1,8	837,1	952,9	1113
1,9	881,5	1012	1191
2	930,3	1076	1275

В табл. 13 показаны оптимизированные параметры системы управления.

Таблица 13

Без учета неопределенности				С учетом неопределенности			
P_1	T_{i1}	K_{dec1}	ISE	P_1	T_{i1}	K_{dec1}	ISE
-1	840	1	1580	-7	540	0.8	474.9
P_2	T_{i1}	K_{dec2}	ISE	P_2	T_{i1}	K_{dec2}	ISE
0.4747	450	1	1157	1.4	350	0.7	663

На рис. 14 и 15 приведены графики зависимости интеграла квадратичной ошибки от значения настроечных коэффициентов соответственно K_{dec1} и K_{dec2} развязывающих устройств D_{21}^* и D_{12}^* . На рис. 16 и 17 показаны переходные процессы контуров управления для выходных переменных y_1 и y_2 под контролем системы управления без учета и с учетом неопределенностей.

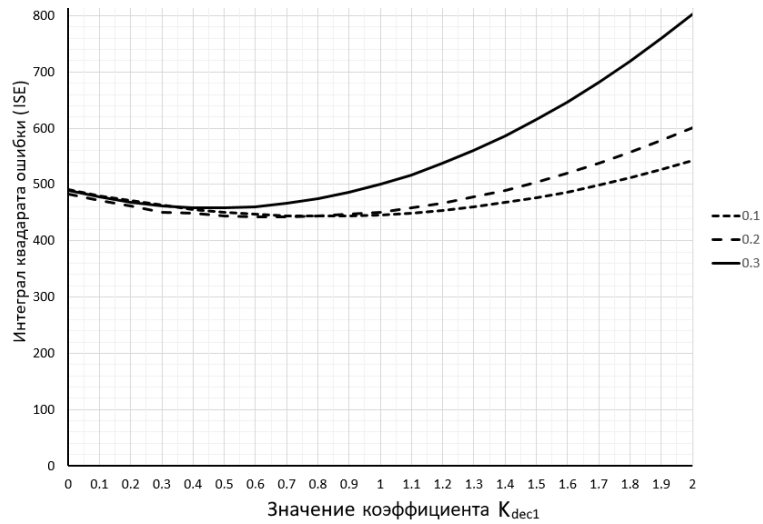


Рис. 14. График зависимости интеграла квадратичной ошибки от значения коэффициента K_{dec1} развязывающего устройства D_{21}^* .

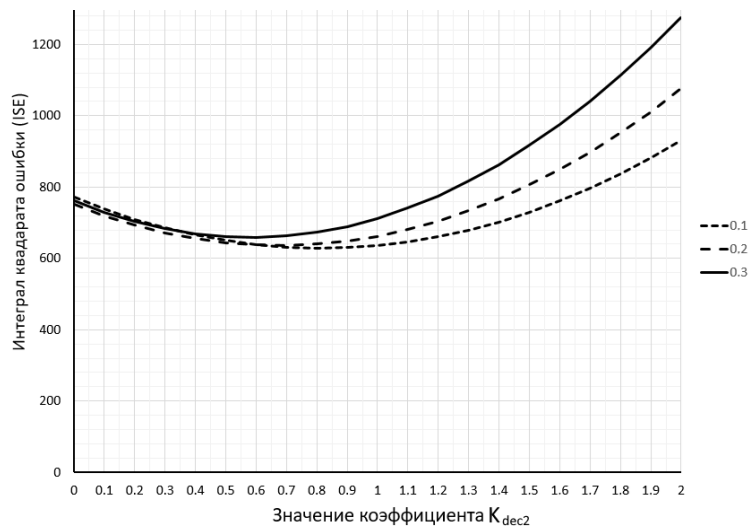


Рис. 15. График зависимости интеграла квадратичной ошибки от значения коэффициента K_{dec2} развязывающего устройства D_{12}^* .

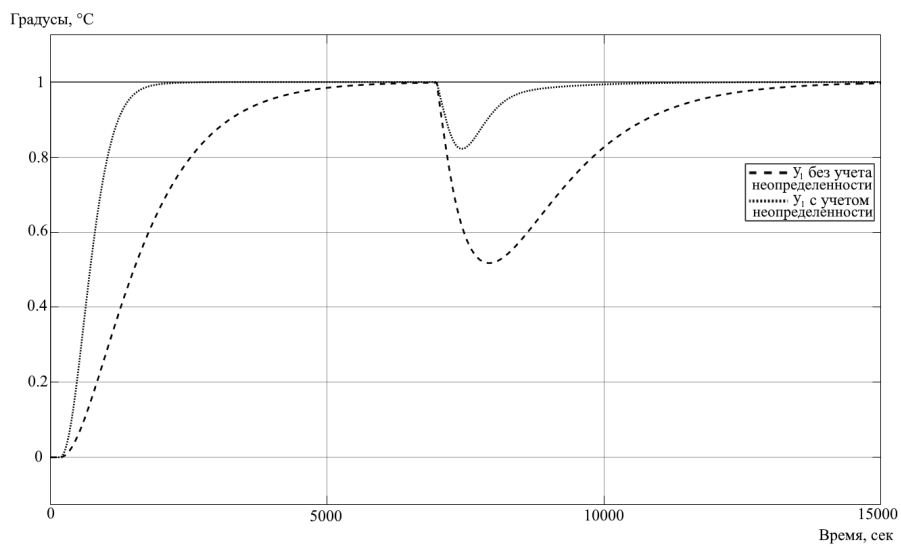


Рис. 16. Сравнительная характеристика переходных процессов в контуре управления выходной переменной y_1 .

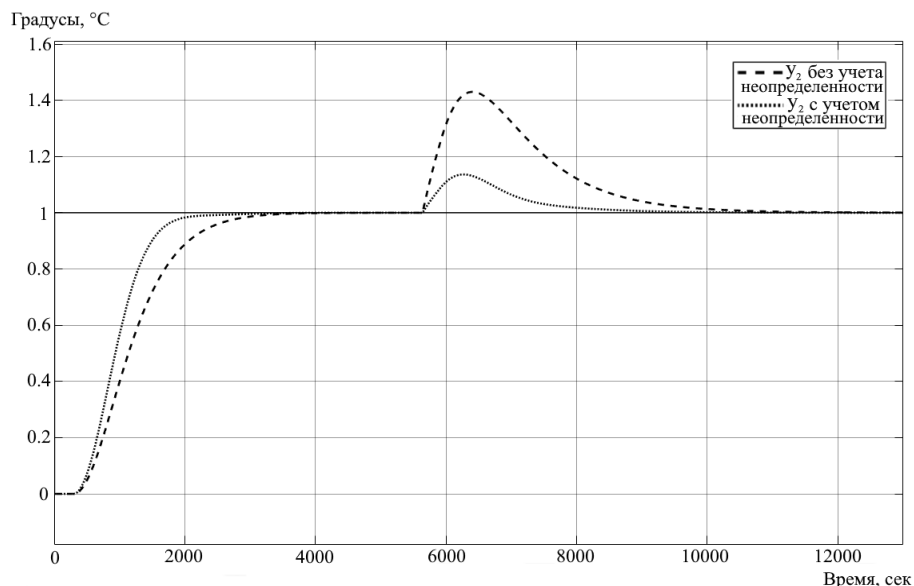


Рис. 17. Сравнительная характеристика переходных процессов в контуре управления выходной переменной y_2 .

Заключение

Основной задачей разработанной системы управления в условиях неопределенности модели объекта является снижение взаимного влияния контуров регулирования выходными переменными y_2 и y_1 . Снижение влияния осуществляется в результате оптимизации параметров ПИ-регуляторов и настроечных коэффициентов развязывающих устройств. При использовании оптимизированных регуляторов и развязывающих устройств в работе в условиях неопределенности получено снижение интеграла квадратичной ошибки в среднем на 65.5% в контуре управления выходной переменной y_1 . В контуре управления выходной переменной y_2 наблюдается снижение интеграла квадратичной ошибки в среднем на 41.2%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2092222 РФ. Способ автоматического управления процессом ректификации / Мустафин А.И. // Официальный бюл. "Изобретения. Полезные модели". – 1997.
2. Пат. 2449827 РФ. Устройство автоматического регулирования процессом ректификации / Шевчук В.П. // Официальный бюл. "Изобретения. Полезные модели". – 2012. – № 13.
3. Бахматдзе Н.Н. Виртуальные анализаторы (идентификационный подход) // Автоматика и телемеханика. – 2004. – № 11. – С. 3-24.
4. Kadlec P., Grbic R., Gabrys B. Review of adaptation mechanisms for data-driven soft sensors // Computers and Chemical Engineering. – 2011. – Vol. 35. – P. 5-7.
5. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Аналитический метод расчета типовых компенсаторов и развязывающих устройств // Информатика и системы управления. – 2010. – № 23. – С. 147-155.

6. *King M.* Process Control A Practical Approach // John Wiley & Sons Ltd, 2011.
7. *Афанасьев В.Н., Бовиук Е.Р.* Построение робастного управления для билинейного объекта с параметрической неопределенностью // Проблемы управления. – 2009. – № 8. – С. 27-32.
8. *Воронов А.А.* Теория автоматического управления. – Ч.1. – М.: Высшая школа, 1986.
9. *Ногин В.Д.* Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – № 4. – С. 73-82.
10. *Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б.* Математическая теория автоматического управления. – М.: Из-во URSS, 2019.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым.

Email:

Рычков Дмитрий Андреевич – rychkov_da@students.dvfu.ru;

Торгашов Андрей Юрьевич – torgashov@iacp.dvo.ru.