

Пастушенко В. С.,
Стопакевич А. А.,
Стопакевич А. А.

МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННОЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ УТИЛИЗАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПРОИЗВОДСТВО МЕТАНОЛА

Разработана современная высококачественная модельно-прогнозирующая система управления ректификационной колонной, которая является основным аппаратом новейшего технологического процесса утилизации углекислого газа в производство метанола. Промоделирован процесс производства метанола. Показано, что разработанная система управления очень хорошо парирует основные возмущения по изменению концентрации продукта, который поступает в колонну с реактора синтеза.

Ключевые слова: модельно-прогнозирующее управление, ректификационная колонна, технологический процесс, утилизация, углекислый газ, метанол.

1. Введение

Проблема экономного использования энергоресурсов в Украине является одной из самых актуальных. Недавно в мире произошла одна из технологических революций. Превращение углекислого газа в метанол. При этом не нужны ни высокое давление, ни высокая температура. Таким образом, открылась возможность утилизировать выбросы котельных и ТЭС (ТЭЦ), производя метанол. Наибольшим рынком метанола является его использование вместо высокооктановых бензинов (автомобильные бензиновые двигатели не требуют переделки) и топлива для тех же котельных, из которых получают углекислый газ. Масштабы мирового производства метанола превышают 20 млн. тонн в год и продолжают стремительно расти, что связано в первую очередь с растущим дефицитом природного газа и нефти, а также с расширением сфер его применения.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Технологическая схема промышленного синтеза метанола с нанесенным на нее рассчитанными в системе технологического моделирования HYSYS [1] режимными параметрами приведена на рис. 1.

Параметры ее потоков приведены в табл. 1.

Анализ схемы показывает, что ее можно разбить на два независимых участка: синтеза и ректификации. Наиболее ответственным участком, от которого зависит качество конечного продукта, является ректификационная колонна (РК) метанола-сырца, которая является объектом данного исследования.

Недостаток такой ректификационной колонны в том, что для длительной эксплуатации необходим гомогенный

катализатор, который сможет катализировать длительное время при взаимодействии углекислого газа и водорода.

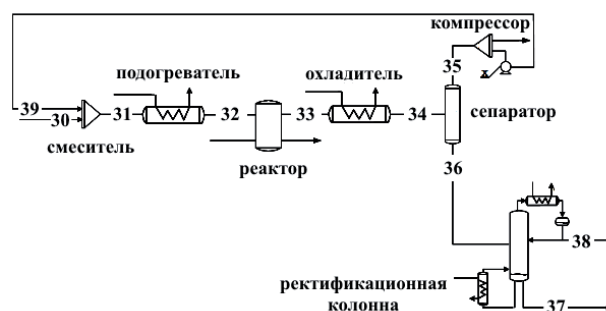


Рис. 1. ТП производства метанола

Таблица 1

Параметры потоков ТП

Параметры потока	Номер потока									
	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
$T, ^\circ\text{C}$	40	44	200	200	40	40	40	180	140	46
$P, \text{кПа}$	4000	4000	3950	3850	3800	3800	3800	1015	1010	4000
$F, \text{кг/ч}$	1000	2746	2746	2746	2746	1760	986	343	643	1746
Концентрации (в мольных долях)										
CO_2	0,25	0,126	0,126	0,08	0,08	0,093	0,01	0	0,001	0,09
H	0,75	0,87	0,87	0,8	0,8	0,902	0,0004	0	0,001	0,9
CH_3O	—	0,003	0,003	0,06	0,06	0,004	0,4943	0,004	0,95	0,004
H_2O	—	0,001	0,001	0,06	0,06	0,001	0,4941	0,996	0,04	0,001

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования — разработка высококачественной системы управления новым технологическим процессом производства метанола из углекислого газа и обес-

печения ее гарантированного качества при действии возмущений по концентрации и расходу питания метанола-сырца.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Рассмотреть РК как объект управления. Определить зависимость концентрации метанола от концентрации метанола в питании.
2. Разработать классическую систему управления и систему управления на базе модельно-прогнозирующего регулятора и выбрать настройки регуляторов.
3. Сравнить результаты работ двух регуляторов.

4. Анализ литературных данных

Использованию модельно-прогнозирующего управления (Model Predictive Control, MPC) для создания высококачественных систем в последнее время уделяют значительное внимание как в науке, так и в производстве [2, 3]. До недавнего времени на производстве был распространен подход, в котором использовался супервизорный принцип построения системы управления. В нем модельно-прогнозирующий регулятор использовался для изменения заданий локальных регуляторов (систем управления в программируемых логических контроллерах (ПЛК)) [4], а не непосредственно управляющих воздействий объекта управления. Такой подход оправдывался требованиями надежности. Однако с развитием промышленных сенсорных сетей и повышением надежности вычислительной техники стало возможно реализовывать компьютерные системы управления без применения ПЛК. Отработанный технологический процесс (ТП) производства метанола из углекислого газа приведен в [5]. В [6] показаны возможности применения метанола как не энергоносителя, а как сырья для синтеза технологически важных продуктов. Эффективность управления колонной рассмотрены в [7, 8]. Применительно к ректификационным колоннам недавние исследования [1, 9] показали целесообразность применения модельно-прогнозирующих регуляторов для управления непосредственно параметрами объекта управления. Так, в работе [10] показано на примере лабораторной ректификационной колонны преимущество такого подхода.

5. Материалы и методы исследования

В данной работе рассмотрена целесообразность использования модельно-прогнозирующего регулятора для управления ректификационной колонной (РК) в технологическом процессе производства метанола с использованием прямого управления параметрами объекта управления. Обоснование эффективности модельно-прогнозирующего управления для РК рассмотренного ТП будет проведено с использованием нелинейной математической колонны динамики РК, построенной по уравнениям, приведенным в работе [7]. В качестве реализации модельно-прогнозирующего регулятора используется Matlab-реализация, одной из отличительных возможностей которой является простота технической реализации системы управления с помощью генератора программного кода для заданной аппаратной платформы и операционной системы (в т. ч. операционная система реального времени (ОСРВ)).

6. Результаты исследования

6.1. Анализ РК как объекта управления. Основным возмущением для системы управления РК, как можно сделать вывод из схемы на рис. 1, является концентрация питания, именно по отношению к ней следует оценивать качество системы управления.

Основными режимными параметрами РК являются: расход питания (F) — 0,6513 кмоль/мин, доля жидкой фазы во входном потоке — 100 %, концентрация метанола в дистилляте (yD) — 0,9561 мол. дол., концентрация метанола в нижнем продукте (xB) — 0,0045 мол. дол. Профиль концентрации РК приведен в табл. 2.

Таблица 2

Профиль расходов и концентраций тарелок РК

№ тарелки	L	V	X	Y
10	0,728378	1,044378	0,897764	0,956100
9	0,728378	1,044378	0,813556	0,915415
8	0,728378	1,044378	0,706761	0,856686
7	0,728378	1,044378	0,591513	0,782204
6	1,378378	1,044378	0,486924	0,701827
5	1,378378	1,044378	0,401443	0,624542
4	1,378378	1,044378	0,297041	0,511723
3	1,378378	1,044378	0,194080	0,373933
2	1,378378	1,044378	0,111872	0,238045
1	0,334000	1,044378	0,056609	0,129546

В профиле (табл. 2) нумерация тарелок указана снизу, расход флегмы (L) и подогреваемого продукта (V) указан в кмоль/мин, концентрация по тарелкам в жидкой (X) и паровой (Y) фазе указана в долях единицы.

6.2. Обзор основных проблем управления бинарными РК. Для рассмотренной РК критически важным параметром является концентрация верхнего продукта (товарного метанола), концентрацией метанола в нижнем продукте (воде) до определенной степени можно пренебречь. График статической зависимости концентрации метанола в верхнем и нижнем продуктах от концентрации в питании показан на рис. 2.

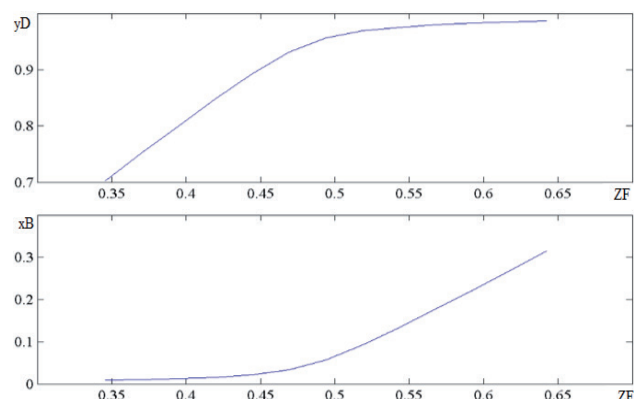


Рис. 2. Зависимость концентрации метанола в дистилляте (yD) и кубовом продукте (xB) от концентрации метанола в питании (ZF)

Проблема выбора каналов системы управления РК при использовании децентрализованных регуляторов

ПИД-семейства не относится к классу однозначно решаемых. Можно выделить две основные подзадачи при такой постановке: управление уровнями и давлением, управление концентрациями и/или температурным режимом. Для рассмотренной РК целесообразно рассмотрение подзадачи управления концентрацией. Сама задача управления может быть упрощена до задачи 4×4 , если принять давление в ректификационной колонне неизменным и стабилизировать его, при необходимости, с помощью локального регулятора по каналу расход хладагента в теплообменник конденсатора — давление верха РК.

В качестве управляющих воздействий РК возможно использовать следующие: L — расход флегмы; V — расход подогретого продукта; D — расход товарного метанола; B — расход воды. В качестве управляемых переменных РК возможно использовать следующие: XB — концентрация метанола в кубовом продукте (воде); YD — концентрация метанола дистилляте (товарном метаноле); MB — количество жидкости (уровень) в ребойлере; MD — количество жидкости (уровень) в конденсаторе.

6.3. Разработка классической (децентрализованной) системы управления РК. При выборе структуры децентрализованной системы управления бинарной РК с использованием регуляторов ПИД-семейства используются как теоретически обоснованные, как и эмпирические правила, обобщенные в [8]. Одним из основных подходов является использование матриц Бристоля [11], с помощью которых возможно выбрать минимально связанные каналы управления ректификационных колонн. Для рассмотренной ректификационной колонны метанола-сырца, которая имеет 10 тарелок метод рекомендует использовать следующие каналы управления:

- расход товарного метанола (D) — Уровень в конденсаторе (MD);
- расход воды (B) — Уровень жидкости низа РК (MB);
- расход флегмы (L) — Концентрация метанола в дистилляте (yD);
- расхода подогретого нижнего продукта (V) — Концентрация метанола в кубовом продукте (xB).

Использование выбранных каналов в указанном случае позволяет достичь автономности регуляторов стабилизации концентраций от регуляторов стабилизации уровней, что так же упрощает выбор параметров регуляторов. Однако, с помощью стандартного подхода к выбору каналов системы управления децентрализованных систем управления на базе регуляторов ПИД-семейства, как так же указано [8], невозможно достичь качественных переходных процессов в системе управления при возмущении по концентрации питания. С использованием рекомендаций по выбору настроек регуляторов для бинарных РК использованы П-регуляторы для стабилизации уровней (для канала D - MD $K_p = -2$, для канала B - MB $K_p = -0,2$) и ПИ-регуляторы для стабилизации концентраций (для канала L - yD $K_p = 2$ и $T_i = 0,01$; для канала V - xB $K_p = -30$, $T_i = 0,1$).

6.4. Разработка системы управления РК на базе модельно-прогнозирующего регулятора. Структурная схема системы управления с модельно-прогнозирующим регулятором, набранная в Matlab Simulink, показана на рис. 3. Параметры регулятора приведены в табл. 3. Настройка регуляторов проводилась в соответствии с рекомендациями, приведенными в [6].

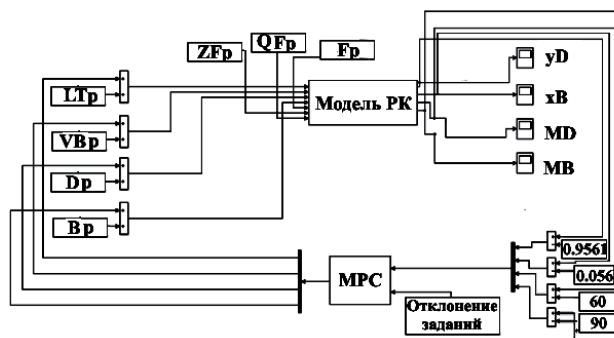


Рис. 3. Структурная схема системы управления РК с использованием модельно-прогнозирующего регулятора

Таблица 3

Параметры настройки модельно-прогнозирующего регулятора

Параметр	Название параметра в Matlab	Значение параметра
Шаг дискретности (c)	Control interval	0,5
Горизонт предсказания	Prediction horizon	500
Горизонт управления	Control horizon	2
Баланс устойчивости и скорости	Weight tuning	0,8
Чувствительность наблюдателя	Estimation	0,5

Переходные процессы в обоих САУ показаны на рис. 4, 5.

Для полного сравнительного анализа переходных процессов в двух исследуемых системах управления было проведено 7 экспериментов: при возмущении по расходу флегмы (LTD), расходу подогретого продукта (VBD), расходу дистиллята (DD), расходу кубового продукта (BD), доли жидкости в питании (QFD), расхода питания (FD), концентрации питания (ZFD). Переходные процессы оценивались по двум критериям: модулю максимального отклонения (y_m) и времени регулирования (t_p). Результаты анализа по самому важному параметру — концентрации товарного метанола — показаны в табл. 4.

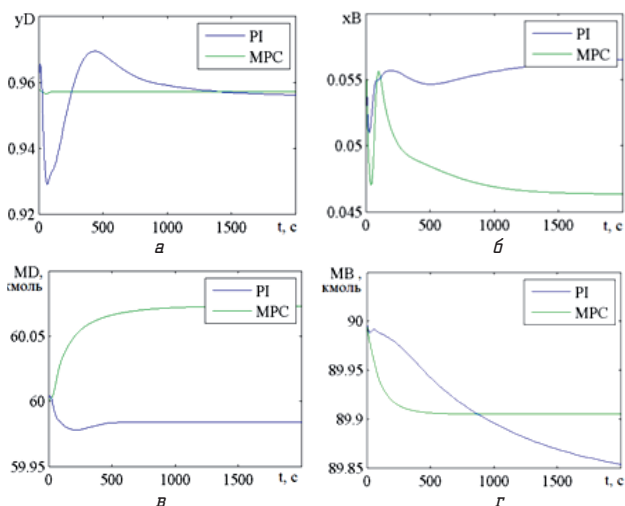


Рис. 4. Переходные процессы в системах управления при возмущении увеличением расхода питания на 0,05 кмоль/мин при применении PI и MPC регуляторов, изменение: а — концентрации метанола в дистилляте; б — концентрации метанола в нижнем продукте; в — уровня в конденсаторе; г — уровня в низе РК

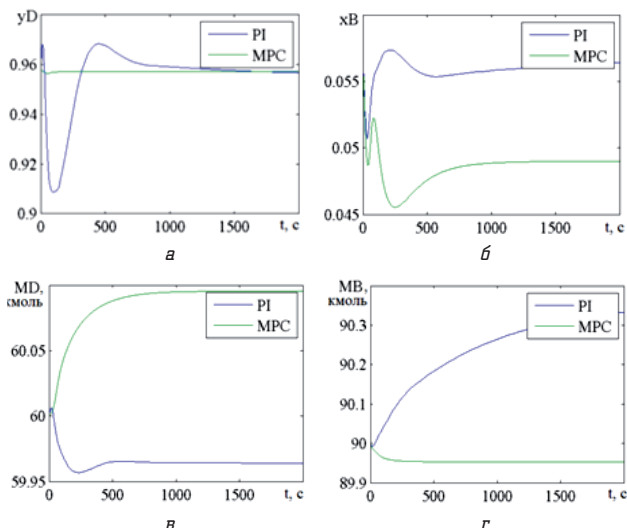


Рис. 5. Переходные процессы в системах управления при возмущении снижением концентрации метанола в питании на 10 % (0,0494) и при применении PI и MPC регуляторов, изменение: а — концентрации метанола в дистилляте; б — концентрации метанола в нижнем продукте; в — уровня в конденсаторе; г — уровня в низе РК

Таблица 4

Показатели качества переходных процессов в исследуемых системах управления по концентрации дистиллята

САУ	LTD = 0,03		VBD = 0,03		DD = 0,04		BD = 0,04	
	U_m	t_p	U_m	t_p	U_m	t_p	U_m	t_p
Классическая	0,0059	1000	0,0139	500	0,0211	750	0,0096	500
MPC	0,00001	10	0,001	100	0,0005	100	0,001	100
САУ	QFD = -0,05		FD = 0,05		ZFD = -0,0494		—	
	U_m	t_p	U_m	t_p	U_m	t_p	—	
Классическая	0,0239	500	0,0261	1000	0,0048	500	—	
MPC	0,002	100	0,0005	100	0,02	100	—	

Результаты, приведенные в табл. 4, показывают, что качество переходных процессов в системе с модельно-прогнозирующим регулятором выше при всех возмущениях, кроме возмущения по фазовому состоянию входного потока. Однако последнее в рассмотренном ТП практически не встречается.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Сильной стороной исследования является разработка модельно-прогнозирующего регулятора для непосредственного управления параметрами ректификационной колонны в технологическом процессе производства метанола из смеси водорода и углекислого газа. Об этом свидетельствуют результаты сравнения PI и MPC регуляторов. При любых возмущениях качество переходных процессов лучше, чем в PI.

Weaknesses. Слабая сторона состоит в том, что проблема выбора каналов системы управления РК при использовании децентрализованных регуляторов ПИД-семейства не относится к классу однозначно решаемых.

Opportunities. Рассмотренный объект перспективный для утилизации углекислого газа в производство

метанола на предприятиях, электростанциях, котельных и т. д. При внедрение ректификационной колонны будет уменьшено количество выбрасываемого CO₂ и использование метанола как готового продукта, так и в качестве сырья. В дальнейшем есть возможность применения MPC регулятора и для других объектов и технологических процессов, для повышения качества переходных процессов.

Threats. Сложности внедрения в том, что нужны капиталовложения на оборудование и программное обеспечение HYSYS. В Украине нет аналогов такого ПО и нет катализатора для длительного использования.

8. Выводы

1. Установлено, что основным возмущением для системы управления РК, является концентрация питания, именно по отношению к ней следует оценивать качество системы управления. Получена зависимость концентрации метанола в дистилляте и кубовом продукте от концентрации метанола в питании. При увеличении концентрации метанола в питании (ZF), концентрация метанола в дистилляте (yD) и в кубовом продукте (xB) увеличивается. При увеличении ZF от 0,35 до 0,65 yD увеличивается в 1,4 раза, а xB в 4 раза.

2. Разработаны 2 системы управления и рассчитаны настройки регуляторов. В отличие от классического линейного управления, алгоритмы модельного прогнозирующего управления (Model Predictive Control, MPC) позволяют учитывать нелинейности, а также использовать процедуру оптимизации. С использованием рекомендаций по выбору настроек регуляторов для бинарных РК рассчитаны П-регуляторы для стабилизации уровней (для канала D-MD Kp = -2, для канала B-MB Kp = -0,2) и ПИ-регуляторы для стабилизации концентраций (для канала L-yD Kp = 2 и Ti = 0,01; для канала V-xB Kp = -30, Ti = 0,1). Для системы с MPC были рассчитаны: шаг дискретности (с) = 0,5; горизонт предсказания = 500; горизонт управления = 2; баланс устойчивости и скорости = 0,8; чувствительность наблюдателя = 0,5.

3. Результаты сравнения показывают, что качество переходных процессов в системе с модельно-прогнозирующим регулятором выше при всех возмущениях, кроме возмущения по фазовому состоянию входного потока. Однако последнее в рассмотренном ТП практически не встречается. Использование MPC-алгоритмов позволяют значительно повысить эффективность работы системы управления.

Литература

1. Стопакевич, А. А. О возможности применения современных САПР химико-технологических систем для синтеза САУ нефтяными ректификационными колоннами [Текст] / А. А. Стопакевич, Н. И. Скакун // 4 Международная научно-практическая конференция «Экономика и управления в условиях построения информационного общества», Одесса, 27-29.04.2015. — Одесса: ОНАС, 2015. — С. 82-84.
2. Стопакевич, А. А. Синтез и исследование цифровых систем супервизорного управления колонной ректификации нефти [Текст] / А. А. Стопакевич, А. А. Стопакевич // Автоматизация технологических и бизнес процессов. — 2015. — № 4 (7). — С. 24-34.
3. Веремей, Е. И. Управление с прогнозирующими моделями [Текст] / Е. И. Веремей, М. В. Сотникова. — Санкт-Петербург: СПбГУ, 2014. — 212 с.

4. Huyck, B. Online model predictive control of industrial processes using low level control hardware: A pilot-scale distillation column case study [Text] / B. Huyck, J. De Brabanter, B. De Moor, J. F. Van Impe, F. Logist // Control Engineering Practice. — 2014. — Vol. 28. — P. 34–48. doi:10.1016/j.conengprac.2014.02.016
5. Van der Ham, L. G. J. Hydrogenation of carbon dioxide for methanol production [Text] / L. G. J. van der Ham, H. van den Berg, A. Benneker, G. Simmelink, J. Timmer, S. van Weerden // Chemical Engineering Transactions. — 2012. — Vol. 29. — P. 181–186. doi:10.3303/CET1229031
6. Wang, L. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB [Text] / L. Wang. — London: Springer, 2009. — 378 p. doi:10.1007/978-1-84882-331-0
7. Skogestad, S. Dynamics and Control of Distillation Columns — A Critical Survey [Text] / S. Skogestad // Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin. — 1997. — Vol. 18, № 3. — P. 177–217. doi:10.4173/mic.1997.3.1
8. Skogestad, S. The Dos and Don'ts of Distillation Column Control [Text] / S. Skogestad // Chemical Engineering Research and Design. — 2007. — Vol. 85, № 1. — P. 13–23. doi:10.1205/cherd06133
9. Kothandaraman, J. Conversion of CO₂ from Air into Methanol Using a Polyamine and a Homogeneous Ruthenium Catalyst [Text] / J. Kothandaraman, A. Goepfert, M. Czaun, G. A. Olah, G. K. S. Prakash // Journal of the American Chemical Society. — 2016. — Vol. 138, № 3. — P. 778–781. doi:10.1021/jacs.5b12354
10. Drgona, J. Model identification and predictive control of a laboratory binary distillation column [Electronic resource] / J. Drgona, M. Klauco, R. Valo, J. Bendzala, M. Fikar // 2015 20th International Conference on Process Control (PC), June 9–12, 2015, Strbske Pleso, Slovakia. — Available at: \www/URL: https://www.researchgate.net/publication/278392589_Model_Identification_and_Predictive_Control_of_a_Laboratory_Binary_Distillation_Column. doi:10.1109/pc.2015.7169989
11. Стопакевич, А. А. Системный анализ и теория сложных систем управления [Текст] / А. А. Стопакевич. — Одесса: Астропринт, 2013. — 380 с.

МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЩЕ УПРАВЛІННЯ РЕКТИФІКАЦІЙНОЮ КОЛОНОЮ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ УТИЛІЗАЦІЇ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ В ВИРОБНИЦТВІ МЕТАНОЛУ

Розроблена сучасна високоякісна модельно-прогнозуюча система управління ректифікаційною колоною, яка є основним апаратом новітнього технологічного процесу утилізації вуглекислого газу в виробництво метанолу. Промодельований процес виробництва метанолу. Показано, що розроблена система управління дуже добре парює основні збурення по зміні концентрації продукту, який поступає в колону з реактору синтезу.

Ключові слова: модельно-прогнозуюче управління, ректифікаційна колона, технологічний процес, утилізація, вуглекислий газ, метанол.

Пастушенко Віталій Семенович, кафедра автоматизації теплоенергетических процесов, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: vitaliyenergin@gmail.com. Стопакевич Алексей Аркадьевич, кандидат техніческих наук, доцент, кафедра автоматизації теплоенергетических процесов, Одеський національний політехнічний університет, Україна. Стопакевич Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологіческих процесов и производств, Одесская национальная академия связи им. О. С. Попова, Украина.

Пастушенко Віталій Семенович, кафедра автоматизації теплоенергетических процесів, Одеський національний політехнічний університет, Україна.

Стопакевич Олексій Аркадійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації теплоенергетических процесів, Одеський національний політехнічний університет, Україна.

Стопакевич Андрій Олексійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологіческих процесів і виробництв, Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова, Україна.

Pastushenko Vitalii, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: vitaliyenergin@gmail.com.

Stopakevich Oleksii, Odessa National Polytechnic University, Ukraine. Stopakevich Andrii, Odessa National Academy of Telecommunications named after O. S. Popov, Ukraine

УДК 681.51

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.856635

**Слободян И. В.,
Ложечников В. Ф.,
Стопакевич А. А.**

СИНХРОНИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ОДНОТИПНЫХ КОТЛОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ОБЩУЮ МАГИСТРАЛЬ

Разработана современная оптимальная система управления, выполняющая функции, как синхронизации работы котлов, так и стабилизации их синхронного поведения при реакции на возмущения, связанные с изменением нагрузки потребителей. Синхронизировано три однотипных котла типа ПТВМ-50, составляющих основу современных тепловых котельных в районах городов Украины.

Ключевые слова: синхронизация, однотипные котлы, система управления, стабилизация, магистраль, возмущение.

1. Введение

В системах управления, где может быть два и более котла-агрегата, остро становится проблема управления всей системой в целом. При работе такие системы получают возмущение и главная задача большой системы —

это справиться с этими возмущениями, с учетом того, что они находятся в общей цепи.

В промышленности распространена ситуация, когда однотипные агрегаты связаны общей технологической задачей и единой нагрузкой. Такие агрегаты могут работать как асинхронно, так и синхронно.