

## МЕТОДЫ АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СУДНА

Современное морское судно представляет собой объект управления, который в зависимости от конструкции, местонахождения, характера перевозимого груза и других факторов, подвергается воздействию внешних и внутренних возмущений, в том числе и нелинейно изменяющихся во времени [1]. Например, система кондиционирования и вентиляции СКВ судна подвержена воздействию таких возмущений, как температура заборной воды, солнечная активность, скорость и температура воздушных потоков, меняющиеся температурные условия внутри помещений и т.д. (рис. 1).

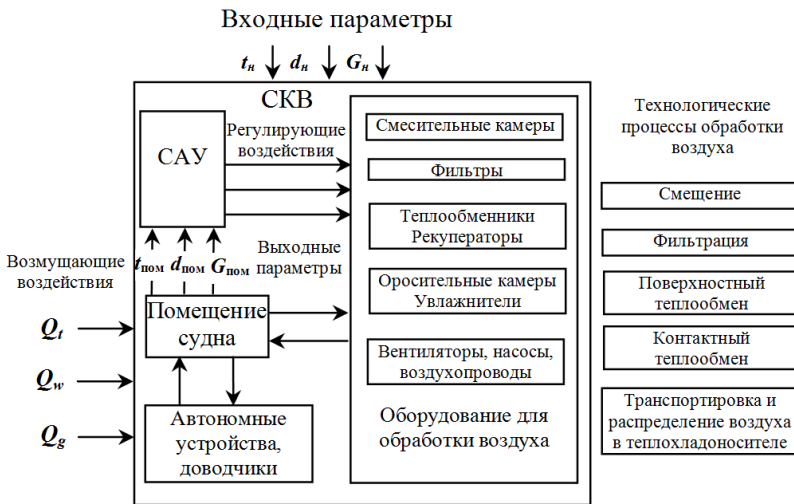


Рис. 1. Обобщенная структурная схема СКВ судна как объекта автоматизации:  $t_n, d_n, G_n$  – температура, влажность, расход наружного воздуха;  $t_{пом}, d_{пом}, G_{пом}$  – температура, влажность, расход воздуха в помещении;  $Q_t, Q_w, Q_g$  – тепловая, влажностная и газовые нагрузки

Температура и влажность воздуха внутри помещений судна являются жизненно важными параметрами, от стабилизации значений которых зависит состояние здоровья экипажа и пассажиров.

Для поддержания заданных значений климатического контроля на современных судах широко используются системы автоматизированного регулирования (САР). Как правило, в САР применяются типовые регуляторы (П, ПИ, ПИД), настройку которых производят электромеханики, обычно используя классические методы анализа передаточной функции объекта  $W_{об}(s)$  [2]. Однако в силу влияния неконтролируемых факторов (см. рис. 1), изначально заложенные в математическую модель значения параметров объекта подвергаются изменению, в силу чего система регулирования перестает быть достаточно адекватной объекту (помещению судна). Это приводит к необходимости частой перенастройки регуляторов вследствие неудовлетворительной работы САР. Основным направлением развития промышленных регуляторов является разработка методов, позволяющих снизить затраты человеческого труда на их установку, настройку и обслуживание. Анализ проблем показал, что в настоящий момент отсутствуют простые, надежные и общепринятые методы автоматической настройки. Процесс перенастройки системы регулирования, в свою очередь, вызывает дополнительные затраты энергии, колебания температурного режима на судне и т.д. Для компенсации перечисленных факторов предлагается внедрение адаптивных САР.

Целью статьи является практическое решение вышеперечисленных проблем путем анализа табличного метода адаптации и метода Зиглера-Николса [3] для типовых (П, ПИ, ПИД) систем регулирования с объектом, действующим в неопределенных условиях, т.е. при влиянии внешних и внутренних возмущений изменяющихся случайным образом.

Для того чтобы определить характер поведения САР при возмущающих воздействиях, как правило, можно ограничиться построением переходной функции системы  $W_{сист}$ , описывающей реакцию САР на единичное ступенчатое воздействие.

Основной задачей исследований в данной публикации является улучшение регулировочных характеристик непосредственно регуляторов системы микроклимата, следовательно, в качестве объекта управления можно рассматривать практически любое отдельно взятое помещение судна с системой регулирования температуры, действующей на основе воздушного отопления или охлаждения (рис. 2), в которой в качестве исполнительного органа используется трехходовой клапан с электроприводом.

Расход теплоносителя, проходящего через теплообменник, регулируется за счет изменения проходного сечения клапана. Управляющий сигнал на исполнительный механизм клапана отсылает типовой регулятор. В свою очередь, регулятор получает информацию от датчика

температуры воздуха (ТЕ), находящегося в помещении и реагирующего на ее отклонение от заданной уставки. Контур регулирования является замкнутым. При этом предусматривается количественно-качественный способ регулирования, т.е. колебания теплопоступлений и теплопотерь в помещении устраняются за счет изменения температуры приточного воздуха при постоянном его расходе. В свою очередь, температура притока изменяется вследствие подмешивания того или иного количества охлажденной воды из обратного трубопровода через трехходовой клапан к горячей воде, поступающей в теплообменник, также при постоянном общем ее расходе.

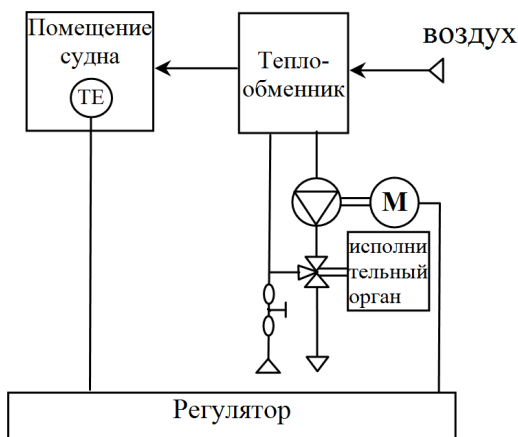


Рис. 2. Функциональная схема автоматизации СКВ помещения судна

В качестве объекта исследования взято наиболее функционально значимое и уязвимое, в силу своего расположения, помещение судна – ходовой мостик. Примем его основным элементом или объектом СКВ. Для поддержания заданных параметров в это обслуживаемое помещение подается приточный воздух с параметрами, отличными от параметров внутри помещения. Перемешиваясь с внутренним воздухом и вытесняя его, приточный воздух ассимилирует избыточное тепло и влагу, подогревает и увлажняет воздух помещения.

Известно, что обслуживаемое помещение характеризуется рассредоточенными показателями воздуха [4]. Однако, в силу сложности анализа всех факторов, учет рассредоточенных характеристик затруднен, поэтому ходовой мостик при решении задач автоматического регулирования надо рассматривать как объект с сосредоточенными параметрами, т.е. температура и влажность воздуха определяются в наи-

более типичной (рабочей) зоне. Именно в такой зоне должны быть установлены датчики регулируемых параметров.

На функциональной схеме рассматриваемого помещения (рис. 3) выделены внешние возмущающие воздействия (тепловая  $Q_n$ , влажностная  $W_n$  и аэродинамическая  $G_n$  нагрузки) и внутренние (тепловая  $Q_{\text{пом}}$ , влажностная  $W_{\text{пом}}$  и газовая  $C_{\text{пом}}$  нагрузки). Входными параметрами являются: температура  $t_{\text{под}}$ , влажность  $d_{\text{под}}$  и расход подаваемого в помещение воздуха  $G_{\text{под}}$ , и соответственно регулируемые:  $t_{\text{пом}}$ ,  $d_{\text{пом}}$  и  $C_{\text{пом}}$ . В системах комфортного кондиционирования для стабилизации заданного состояния воздуха, т. е. двух независимых переменных  $t_{\text{пом}}$  и  $d_{\text{пом}}$  можно использовать, в общем случае, три управляющие воздействия:  $t_{\text{под}}$ ,  $d_{\text{под}}$  и  $G_{\text{под}}$ . Особенности применения каждого определяются исходными условиями, ограничениями, накладываемыми на систему, а также экономическими соображениями.

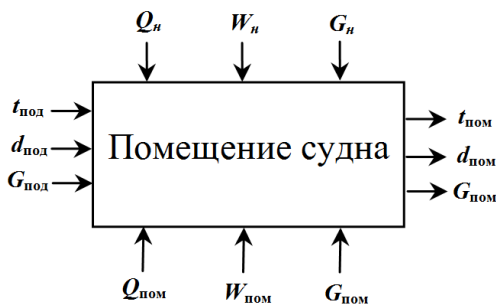


Рис. 3. Функциональная модель ходового мостика как объекта регулирования

Обобщенную структурную схему САР можно представить в виде, показанном на рис. 4.

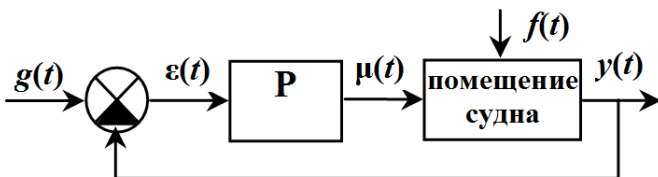


Рис. 4. Обобщенная структурная схема САР:  $P$  – регулятор с передаточной функцией  $W_p(s)$ ;  $f(t)$  – возмущающее воздействие;  $y(t)$  – регулируемая величина;  $\varepsilon(t)$  – ошибка регулирования;  $g(t)$  – задающее воздействие;  $\mu(t)$  – управляющее воздействие

Подобное помещение судна представляет собой объект в виде инерционного звена первого порядка. Динамические свойства помещения зависят от кратности воздухообмена  $K_B$ , обобщенного размера помещения  $l_V$  (отношение объема помещения  $V_{\text{пом}}$  к площади поверхности ограждений  $F$ ), коэффициентов теплопередачи ограждений  $K_{\text{огр}}$  и постоянной времени ограждения  $T_{\text{огр}}$  [5]. Аналитически передаточная функция по каналу температуры приточного воздуха получена в виде

$$W_{\text{пр}}(s) = \frac{T_{\text{огр}} \cdot s + 1}{T_{\text{пом}} \cdot s + 1} K_{\text{пом}},$$

где коэффициент передачи помещения (объекта)  $K_{\text{пом}}$  и  $T_{\text{огр}}$  могут быть определены по показателям  $K_B$ ,  $l_V$ ,  $K_{\text{огр}}$ , теплопроводности  $c_B$  и плотности  $\rho_B$  воздуха [4];  $T_{\text{пом}}$  – постоянная времени помещения,  $T_{\text{пом}} \approx K_B^{-1}$ .

В силу того, что значения параметров аналитической модели в зависимости от типа помещения и его конструкции являются переменными, для получения адекватной модели объекта используем графическую обработку экспериментальной кривой разгона (рис. 5). Кривая разгона демонстрирует изменения температуры воздуха в помещении в течении суток при влиянии внешних и внутренних факторов из условий нахождения судна в районе экватора. Здесь учтено что ходовой мостик, как правило, помещение находящееся на верхней палубе под непосредственным воздействием солнечных лучей окон, стен и крыши, что делает его особенно уязвимым к внешним возмущениям и подверженным резким перепадам температур.

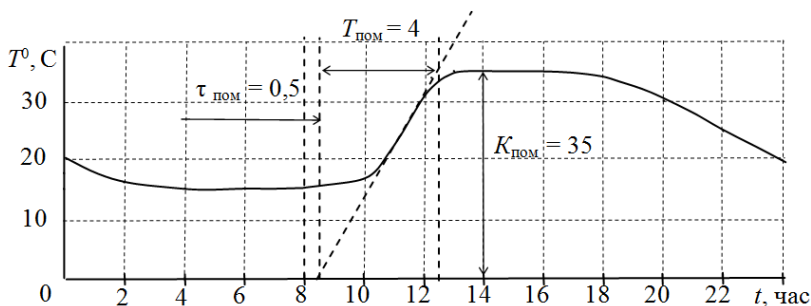


Рис. 5. Кривая разгона температуры воздуха помещения судна

Подобные разгонные кривые можно получить исходя из общедоступных данных по многолетнему наблюдению температур практиче-

ски в любой точке нахождения судна.

Учитывая, что для помещений характерны периоды изменения составляющих тепловой нагрузки от нескольких минут до часов, в задачах с такими периодами колебаний можно пренебречь инерционностью ограждений и представить помещение апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием и передаточной функцией

$$W_{\text{пр}}(s) = \frac{K_{\text{пом}}}{T_{\text{пом}} \cdot s + 1}.$$

Обработка экспериментальной кривой разгона на рис. 5 на участке 8 – 18 часов наблюдения позволяет получить следующую функцию:

$$W(s) = (35/4s + 1)e^{0.5s}.$$

Для разработки адаптивной САР СКВ ходового мостика проанализируем один из современных подходов в адаптивных системах регулирования – табличный или формульный метод расчета параметров типового регулятора [5]. Этот метод оптимально подходит для разработки адаптера, выбирающего наилучшие значения настроек регуляторов, что позволяет получить ожидаемые критерии качества переходного процесса при изменении значений параметров помещения, найденных в процессе обработки кривой разгона:  $K_{\text{пом}}$ ,  $T_{\text{пом}}$  и  $\tau_{\text{пом}}$  – запаздывания (см. рис. 5).

Данный метод актуален для судна, т.к. управление настройками регулятора с использованием таблиц по методу Копеловича целесообразно использовать в тех случаях, когда экспериментально можно получить ряд передаточных функций объекта при влиянии на него неопределенных возмущений. Зная заранее возможные изменения режима работы системы (в нашем случае параметры внешней среды – температуру воздуха, воды, скорость ветра и течения, солнечную активность и т.д.), эксперт-наладчик выполняет идентификацию объекта для нескольких разных режимов и для каждого из них находит значения параметров (настроек) регулятора. Значения этих параметров записывают в таблицу. В процессе функционирования системы датчики измеряют величину, которая характеризует режим работы системы и в зависимости от ее значений адаптер выбирает из таблицы величины коэффициентов П, ПИ или ПИД-регулятора.

Недостатком этого метода являются большие затраты на предварительную идентификацию, необходимую для составления таблицы. Однако эту проблему частично можно решить применением специальных программных средств и общедоступных данных для автоматической идентификации и адаптации регулятора, после выполнения которых полученные параметры заносятся в таблицу или блок адаптера.

Предложим адаптивную автоматизированную систему регулирования (ААСР) температуры воздуха в помещении судна (рис. 6).

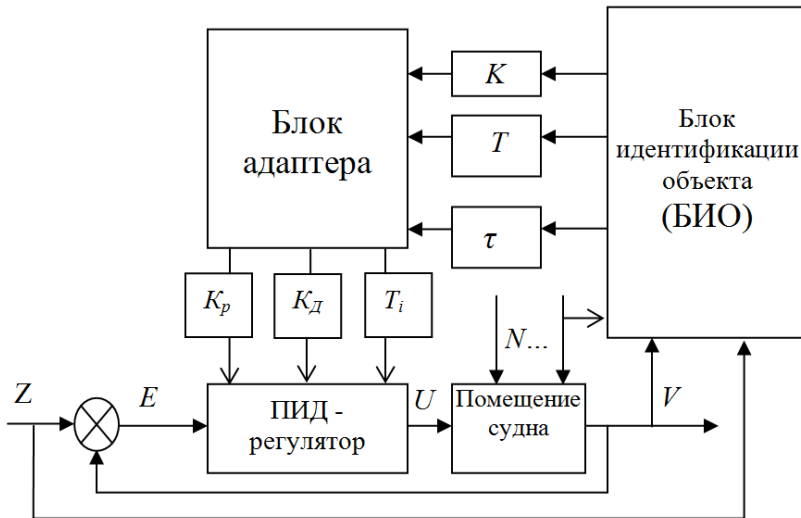


Рис. 6. Структура адаптивного ПИД-регулятора с объектом управления:  $E$  – ошибка;  $Z$  – задание;  $V$  – выходное значение;  $N$  – возмущение;  $U$  – управляющее воздействие;  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  – значения настроек ПИД-регулятора

В задачу блока идентификации объекта (БИО) входит наблюдение и оценка значений параметров объекта регулирования. Блок адаптации самостоятельно производит подборку новых настроек регулятора, выбирая его алгоритм (П, ПИ, ПИД) и осуществляет автонастройку. Наличие блока позволяет стабилизировать процесс регулирования без участия оператора и остановки оборудования. Блок идентификации проводит идентификацию объекта, функционирующего в условиях неопределенности.

Рассмотрим вариант работы адаптивной системы при нахождении судна в четырех точках с внешней температурой воздуха 10, 15, 30 и 35°С, пренебрегая другими возмущениями и не меняя параметры передаточной функции помещения  $T_{\text{пом}} = 4$  часа,  $\tau_{\text{пом}} = 0,5$  часа.

Рассчитаем значения параметров настроек регуляторов  $K_p$ ,  $T_i$  и  $T_d$  по заданным формулам (см. табл. 1) табличного метода для объектов с самовывравниванием [8], с целью получения наилучшего переходного процесса в системе СКВ судна.

Таблица 1

Формулы для определения оптимальных настроек по Копеловичу

Закон регулирования	Апериодический переходной процесс	Процесс с 20 %-ным перерегулированием	Минимальный интегральный критерий качества $\min \int x^2 dt$
И	$K_{p1} = \frac{1}{4,5K_{об}T_{об}}$	$K_{p1} = \frac{1}{1,7K_{об}T_{об}}$	$K_{p1} = \frac{1}{4,5K_{об}T_{об}}$
П	$K_p = \frac{0,3T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$	$K_p = \frac{0,7T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$	$K_p = \frac{0,9T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$
ПИ	$K_p = \frac{0,6T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 0,6T_{об}$	$K_p = \frac{0,7T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 0,7T_{об}$	$K_p = \frac{T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = T_{об}$
ПИД	$K_p = \frac{0,95T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 2,4\tau_{об};$ $T_d = 0,4\tau_{об}$	$K_p = \frac{1,2T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 2,0\tau_{об};$ $T_d = 0,4\tau_{об}$	$K_p = \frac{1,4T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 1,3\tau_{об};$ $T_d = 0,5\tau_{об}$

Примем, что САР реализует апериодический тип переходного процесса. Тогда, выполнив соответствующие расчеты, получим значения  $K_p$ ,  $T_i$  и  $T_d$  настроек регулятора для блока адаптации. Для анализа предложенного метода проведем компьютерный эксперимент, считая, что необходимо поддержать оптимальную для жизнедеятельности моряков температуру воздуха  $t = 20^\circ\text{C}$  при различных местоположениях судна [1].

Для выбора оптимальных настроек регулятора, вносимых в табличный алгоритм адаптации, с помощью программы MathLab (Simulink) [6] смоделируем САР (рис. 7).

Как видно из рис. 7, модель содержит схемы с тремя типами регулирования – П, ПИ и ПИД, учитывает воздействие внешнего возмущения и транспортную задержку. Для удобства исследования принято, что помещение до регулирования принимает температуру внешней среды по каналу возмущения. Осциллограф показал переходные процессы, показанные на рис. 8. Их анализ показал, что при использовании настроек по табличному методу адаптации ПИ и ПИД регулирование продемонстрировало расходящиеся процессы при всех температурных режимах, а П-регулятор достиг затухающего процесса с остаточной ошибкой (см. рис. 8). Таким образом, использование данного метода не является эффективным и требует поиска новых научных подходов.



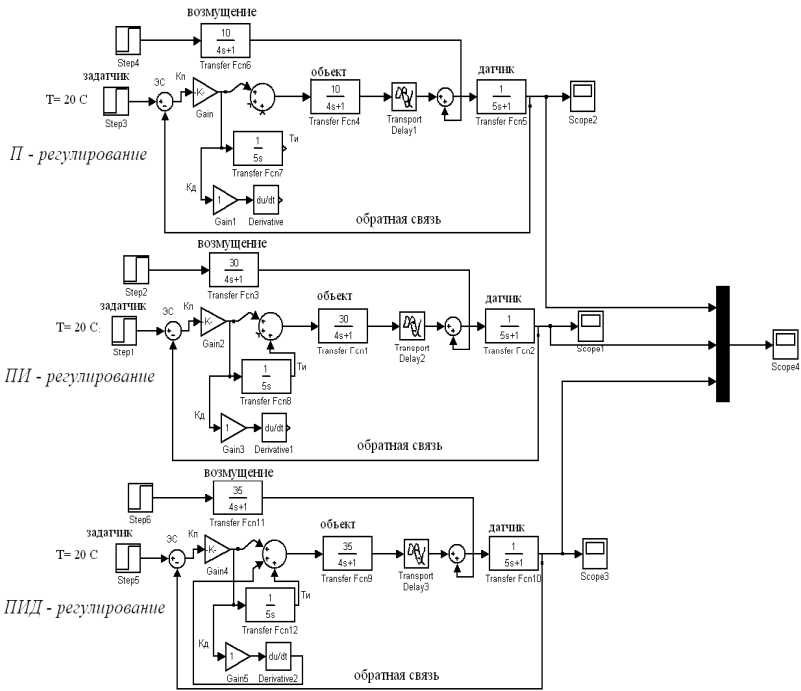


Рис. 7. Компьютерная модель САР помещения судна с тремя типами регуляторов

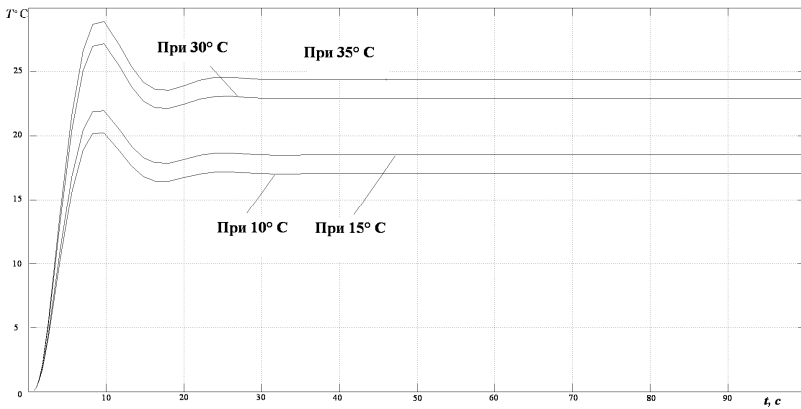


Рис. 8. Переходные процессы САР с формульными настройками П-регулятора

Анализ широко используемого в адаптивных САУ метода Зиглера-Николса, также продемонстрировал свою неэффективность, показав расходящиеся процессы при всех температурах.

Исходя из полученных результатов, предполагается рассмотреть экспертные методы адаптации [8]. Известно, что опытные эксперты-наладчики в процессе ручной настройки САР достигают качественных результатов, исходя из анализа переходной характеристики. Используя экспертные рекомендации при корректировке настроек  $T_n$  и  $T_d$  (например при  $30^0$ ) получим переходные процессы, представленные на рис. 9.

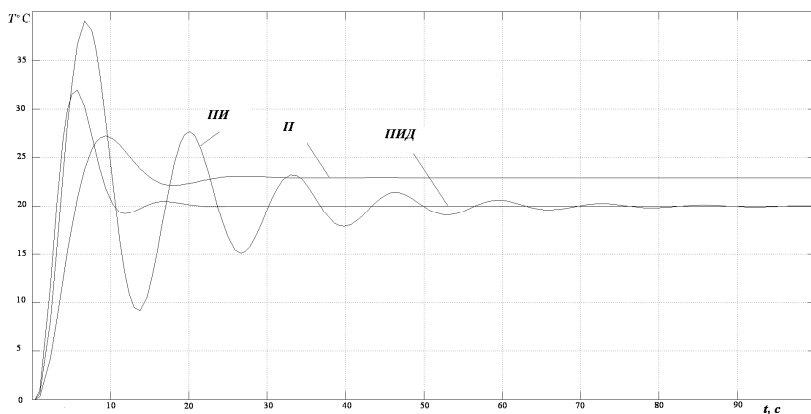


Рис. 9. Переходные процессы САР с ручной подстройкой регуляторов

Переходные процессы на рис. 9, полученные по табличному методу демонстрируют преимущество П-регулятора, показывающего затухающий процесс, со временем регулирования  $T_p = 13$  с. Подстановка других значений передаточных функций объекта управления, исходя из влияния внешних возмущений, также указывает на эффективность П-регулятора по сравнению с ПИ и ПИД в процессе регулирования температуры. Однако при экспертной ручной настройке можно добиться улучшения работы этих типов регуляторов (рис. 9), но переходные процессы будут обладать большим  $T_p$  и колебательностью. Для уменьшения остаточной ошибки в П-регуляторе рекомендуется ввести в адаптере функцию изменения задания температуры.

Результатами работы можно считать то, что на основе анализа переходных процессов (см. рис. 8 - 9), можно сделать заключение о желательной корректировке табличного метода адаптации и поиске новых, более эффективных методов регулирования, например, с исполь-

зованием опыта эксперта. Проверка данного утверждения (проведенное моделирование) показало возможность формирования таблицы правил адаптации с оптимальным рекомендуемым вариантом значений настроек адаптивного регулятора для помещения ходового мостика судна с учетом мнений экспертов. В результате предложена адаптивная автоматизированная система регулирования ААСР СКВ помещения.

Таким образом, проведенный обзор и анализ современных тенденций в разработках САР СКК (систем климат-контроля) совместно с проведенными исследованиями делают очевидным тот факт, что использование адаптивного регулирования в системе контроля климата судовых помещений дает возможность:

- сократить время настройки контуров регулирования температуры и требования к квалификации обслуживающего персонала – электромехаников;
- гарантировать наилучшее качество управления СКК в любой момент времени и в любом местоположении широкого класса судов;
- обеспечить непрерывный процесс подстройки параметров регулятора под изменяющиеся свойства помещений.

Как показывает практика, адаптивные регуляторы позволяют экономить до 15 % энергоресурсов по сравнению с ручным управлением или порядка 5 % по сравнению с неоптимально настроенным классическим ПИД регулятором. Кроме того, применение адаптивного регулирования ведет к сокращению сроков и стоимости пуско-наладочных работ [7]. Так как современная электроника обладает огромными аппаратными ресурсами, в зависимости от требований к САР можно предусмотреть алгоритм работы блока адаптации с автоматическим просчетом регулировочных характеристик и дополнить его всеми известными методами синтеза регуляторов, от традиционных (Ротача, АФХ, Зиглера-Николса, Л.И. Кона, метод незатухающих колебаний) до суперсовременных на основе нечеткой логики, нейронных сетей и генетических алгоритмов. Благодаря таблице оптимальных настроек блок адаптации предложенного варианта построения САР определяет наилучший вариант работы системы СКВ помещения судна.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голиков В.А. Научные основы управления микроклиматом судна. – Одесса: ОГМА, 1999. – 321 с.
2. Ротач В.Я. Теория автоматического управления – М.: МЭИ, 2008. – 396 с.

3. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами – М, МГТУ им. Баумана, 1993. – 492 с.

4. Сотников А. Г. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции. Л.: Машиностроение, 1984. – 235 с.

5. О совершенствовании автоматического регулирования систем обеспечения микроклимата. // "Сантехника. Отопление. Кондиционирование" – 2005. – № 5. – С. 112 - 114.

6. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 778 с.

7. Климовицкий М.Д., Копелович А.П.. Автоматический контроль и регулирование в чёрной металлургии: справочник. – М.: Металлургия, 1967. – 425 с.

8. Михайленко В.С., Ложечников В.Ф. Методы настройки нечеткого адаптивного ПИД- регулятора. // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2009. - №2(24). – С. 174 - 180.