

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-253-5-92-99>

УДК 621.316.79

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В СУДОВОМ КОНДИЦИОНИРУЕМОМ ПОМЕЩЕНИИ

Василец Д. И., Козьминых Н. А., Налева Г.В., Онищенко О. А.

STABILIZATION SYSTEM FOR AIR TEMPERATURE IN A SHIP AIR-CONDITIONED ROOM

Vasilets D. I., Kozminykh N. A., Naleva G.V., Onishchenko O. A.

Описана работа традиционной системы стабилизации температуры воздуха в кондиционируемой каюте морского судна с пропорционально-интегральным регулятором в контуре управления. Показано, что существующие системы кондиционирования воздуха при изменениях тепловых нагрузок не удовлетворяют требованиям к динамическим режимам стабилизации температуры. Предложена структура системы стабилизации с нечетким ПИД-регулятором, отличающаяся простым принципом фазификации и логического вывода. Методами моделирования показано, что предложенная система обеспечивает высокое качество процессов стабилизации температуры воздуха и обладает свойствами робастности.

Ключевые слова: нечеткий регулятор, двухканальная система, кондиционер, динамика, фаззи.

Введение. При эксплуатации морского судна температура, влажность и давление воздуха в его каютах, служебных и производственных помещениях существенно изменяются. Кроме того, воздух насыщается различными парами, газами, влагой, пылью. Чтобы обеспечить комфортные условия для обитаемости судового экипажа и пассажиров, в помещениях судна необходимо поддерживать постоянным качество (кондицию) воздуха. Поддержание в каютах и иных помещениях морского судна комфортных климатических условий - значимая и актуальная задача, решение которой неоднозначно и является крайне важным, поскольку обеспечивает организму человека необходимые условия труда и отдыха в любое время года и в любом районе плавания судна.

Постановка задачи в общем виде. Организм человека находится в комфортном состоянии, когда отдает в окружающую среду ровно столько же тепла, сколько и вырабатывает [1]. В любом состоянии человеческим организмом непрерывно производится тепло, количество которого, в основном, зависит от его активности - физической нагрузки. Выделяе-

мая теплота (от 50 Вт в состоянии покоя до 180 Вт при большой физической нагрузке) передается окружающему воздуху через кожный покров (явная теплота), испарением влаги с поверхности кожи (скрытая теплота) [1-3].

Любой тепловой или влажностный дисбаланс организма человека с окружающей средой приводит к перегреву или переохлаждению. При этом физиологический терморегуляционный аппарат человека перераспределяет теплоотвод, стремясь акклиматизироваться к изменившимся условиям среды обитания. Например, при увеличении температуры окружающего воздуха в суммарном теплообмене резко увеличивается доля отвода тепла испарением пота, а уже при температуре воздуха меньше 15 °С теплоотдача с поверхности кожи испарением пота минимальна. Пот, испаряясь отбирает от организма избыток тепла (скрытая теплота парообразования пота составляет до 0,79 кДж/г). Если температура окружающего воздуха выше температуры тела, то тепловыделение, в основном, осуществляется испарением. При температуре окружающей среды около 20 °С и умеренных физических нагрузках (100 Вт) отвод тепла от организма человека распределяется, в среднем, на такие части: 22 % на испарение, 32 % на конвекцию и 46 % на радиацию [1, 2]. Количество теплоты, передаваемой конвекцией и испарением, зависит от температуры, влажности и скорости перемещения окружающего воздуха, от теплопроводности одежды и ее вида. Теплообмен между человеком и поверхностями стен и иных ограждений происходит радиацией, а количество и направление радиационного теплообмена зависит от температуры ограждений. Если температура ограждений помещения выше температуры тела, то испарением будет отводиться не только теплота, выделяемая организмом, но и теплота, получаемая телом от ограждений конвекцией и радиацией.

Так, для морского судна [1, 3], в жаркое время года в каютах температура воздуха должна поддерживаться на 6-12 °С ниже температуры наружного воздуха (по существующим нормам, допустимый перепад температуры наружного воздуха и воздуха в каюте составляет от 3 до 12 °С). Например, при температуре наружного воздуха +36 °С, в каюте должна поддерживаться температура воздуха не ниже +24 °С [1, 3-5]. Кроме того, очень важно, чтобы состояние воздуха в каюте допускало дальнейшее его насыщение водяными парами - в воздухе должен существовать дефицит влаги: если влажность воздуха велика, то воздух не поглощает выделенную человеком влагу, возникает обильное потоотделение, дыхание становится тяжелым и учащенным, человек испытывает жажду и быстро утомляется. Воздух с очень низкой влажностью также оказывает негативное воздействие - кожа пересыхает и растрескивается, пересыхает слизистая оболочка и повышается восприимчивость организма к простудным заболеваниям. Чтобы обеспечить в каютах нормальную влажность в зависимости от заданной температуры, воздух осушают в жаркое время и увлажняют зимой. Важное значение в процессах теплообмена имеет скорость движения воздуха в каюте: с ее повышением конвективная теплоотдача и испарение осуществляются интенсивней. Но при высокой скорости воздуха, при которой достигается тепловой баланс, возникает ощущение "сквозняка" [1, 2, 5, 6], обычно сопровождаемого повышенным шумом.

Таким образом, задача кондиционирования воздуха в каютах и помещениях морского судна - поддержание комфортных условий обитания. Но эти условия определяются, главным образом, температурой и соответствующей ей влажностью воздуха (безусловно, в сочетании со скоростью его движения, определенным химическим составом и очисткой воздуха от вредных примесей). Таким образом, фундаментальной основой обеспечения комфортных условий обитаемости в помещениях судна является необходимость стабилизации температуры воздуха в его каютах, служебных и производственных помещениях, что и является основной задачей исследования.

Анализ последних публикаций. Обеспечение комфортного теплового режима человека за счет стабилизации температуры воздуха в каютах морского судна осуществляется различными способами [1-3, 5-7], имеющими свои преимущества и недостатки. В зависимости от способов обработки воздуха, системы комфортного кондиционирования воздуха (СККВ) на судне подразделяют на [2-4] централизованные, автономные и комбинированные. Централизованные - обрабатывают воздух в центральной климатической станции (ЦКС). Из ЦКС воздух вентиляторами нагнетается и распределяется по соответствующим помещениям судна. Автономные системы обрабатывают воздух непосредственно в кондиционируемом помещении. Комбинированные системы - обеспечивают первичную об-

работку воздуха в ЦКС, а его окончательную обработку - в доводочных воздухораспределительных нагревающе-охлаждающих устройствах. По числу воздухопроводов системы кондиционирования на судне подразделяют на одноканальные, двухканальные и местные (автономные). В одноканальных системах воздух обрабатывается до заданных параметров и поступает в кондиционируемое помещение по одному каналу. Холодный и горячий воздух в двухканальных системах движется по двум воздухопроводам и перед подачей в каюты смешивается до заданных параметров. Бесканальные системы применяют в помещениях с местными или автономными кондиционерами [2-4, 5-7].

Очевидно, что при столь различных существующих конструктивных решениях СККВ, способы и системы стабилизации температуры воздуха в кондиционируемых помещениях судна существенно отличны.

Расчет необходимой мощности СККВ обычно, не вызывает затруднений и является статической задачей [2, 5, 7]. Однако построение системы стабилизации температуры воздуха требует учета динамических свойств конкретного помещения, исполнительных органов, компрессорно-конденсаторных агрегатов [8-10] и иных элементов СККВ, без которых действие синтезированных регуляторов температуры становится неэффективным. В [11] синтезирован регулятор температуры для судового помещения, однако в предложенной системе не учитывается тот факт, что динамические свойства объекта управления (например, каюты) существенно изменяются от режима и условий работы СККВ. Построение робастной [12, 13] системы стабилизации температуры в судовом помещении позволяет существенно повысить точность ее поддержания, вне зависимости от района плавания, времени года и изменяющихся тепловых нагрузок. Создание теоретических предпосылок для реализации такой, слабо чувствительной к изменениям параметров объекта управления (каюты, служебного помещения судна) СККВ является целью статьи.

Основной материал исследования. Рассмотрим, применяющуюся в большинстве морских и речных судов, двухканальную СККВ каюты (рис. 1). Считаем, что объектом управления в СККВ является каюта III, в которой необходимо стабилизировать температуру t_n воздуха на заданном уровне.

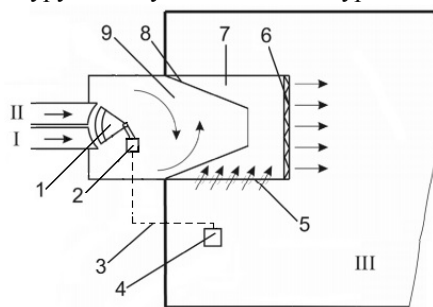


Рис. 1. Общая схема двухканальной СККВ

От СККВ в каюту III воздух поступает по двум воздуховодам I и II (I - холодный, II - теплый воздух). Соотношение массового расхода воздуха определяется положением заслонки 1. При ее перемещении, например, в сторону воздуховода I, расход холодного воздуха уменьшается, а теплого - возрастает. Эти два потока смешиваются в первой смесительной камере 9, причем, из условий работы СККВ, суммарное количество воздуха, поступающего в каюту III (при любом положении заслонки 1) остается неизменным. Относительное значение φ теплого воздуха (в суммарном расходе теплого и холодного воздуха) определяется очевидным образом:

$$\varphi = G_T/G_C = G_X/(G_T + G_X), \quad (1)$$

где G_T и G_X - расход, соответственно, теплого и холодного воздуха, кг/с, а G_C - суммарный расход, кг/с, обработанного воздуха.

Из первой камеры 9 смешивания воздуха, через сопло 8, воздух попадает во вторую, смешивающе-фильтрующую, камеру 7. В сопле 8 предусмотрены специальные жалюзи 5, через отверстия которых осуществляется инжекция внутрикаютного воздуха. Струи обработанного воздуха, через фильтр 6, попадают в каюту. Создающееся избыточное давление вытесняет часть воздуха из каюты через специально предусмотренные вентиляционные решетки или удаляется системой принудительной вентиляции.

Система автоматического управления (САУ) функционирует следующим образом. Сигнал t_{Π} от датчика температуры 4 по каналу отрицательной обратной связи 3 непрерывно сравнивается с сигналом задания t_3 и эта ошибка регулирования $\varepsilon = t_3 - t_{\Pi}$ обрабатывается по алгоритму управления регулятором температуры - исполнительным механизмом (РТ-ИМ) 2. Исполнительный механизм ИМ регулятора температуры своим штоком перемещает заслонку 1 относительно ее среднего (нулевого) положения на угол, пока станет равной нулю ошибка регулирования ε . До тех пор, пока тепловые потоки в каюте компенсируются теплом, поступающим из смешивающе-фильтрующей камеры 7, заслонка 1 неподвижна. Как только появится возмущение (избыточный теплоприток Q_{Π}), САУ обрабатывает ненулевую ошибку ε и перемещает заслонку так, чтобы восстановить тепловое равновесие.

Используя принципы построения математических моделей (ММ) поршневых холодильных установок и их компрессорно-конденсаторных агрегатов (в данном случае - при условии постоянства температуры конденсации хладагента) [8, 10] и методики, изложенные в [9-11, 13, 14], ММ каюты, как управляемого объекта, относительно температуры воздуха t_{Π} , можно представить в виде

$$T_{OY} \frac{d\psi}{d\tau} + \psi = k_{OY} \cdot \mu + f(\tau), \quad (2)$$

где T_{OY} - постоянная времени каюты, о.е.; k_{OY} - коэффициент передачи объекта, рассчитанный на основе базовых значений φ_0 и $t_{\Pi 0}$; $f(\tau)$ - внешнее возмущение, о.е.; $\psi = \Delta t_{\Pi}/t_{\Pi 0}$ - выходной сигнал объекта управления, о.е.; $\mu = \Delta \varphi/\varphi_0$ - входной сигнал объекта управления, о.е. Параметры (2) рекомендовано [11] определять по выражениям:

$$T_{OY} = \frac{V \gamma C_p}{\frac{\partial Q_{\Pi}}{\partial t_{\Pi}} - \frac{\partial Q_C}{\partial t_{\Pi}}}; k_{OY} = \frac{\varphi_0 \cdot \frac{\partial Q_C}{\partial t_{\Pi}}}{\frac{\partial Q_{\Pi}}{\partial t_{\Pi}} - \frac{\partial Q_C}{\partial t_{\Pi}}}; f(\tau) = \frac{t_{\Pi 0} \cdot \Phi(\tau)}{\frac{\partial Q_{\Pi}}{\partial t_{\Pi}} - \frac{\partial Q_C}{\partial t_{\Pi}}}, \quad (3)$$

где Q_C - суммарное количество тепла, вносимого СККВ в каюту, кВт; Q_{Π} - суммарные теплопотери каюты, кВт; V - объем воздуха в каюте, м³; γ - плотность воздуха, кг/м³; C_p - изобарная массовая теплоемкость воздуха, Дж/кг·град; $\Phi(\tau) = -F(\tau) + \Delta t_{\Pi} \cdot (\partial Q_C/\partial t_{\Pi})$ - функция внешнего возмущения, кВт, учитывающая постоянный и переменный во времени теплопритоки.

Динамические свойства датчика температуры и исполнительного механизма можно упрощенно описать выражением

$$T_{P1} \frac{d\eta}{d\tau} + \eta = k_1 \cdot \psi, \quad (4)$$

где $\eta = \Delta S/S_0$ - относительное положение штока РТ-ИМ; k_1 и T_1 - суммарный коэффициент усиления и постоянная времени датчика температуры и ИМ. Свойства заслонки - безинерционные, и потому описываются пропорциональным коэффициентом:

$$\mu = k_2 \cdot \eta, \quad (5)$$

где k_2 - коэффициент усиления управляющего органа (заслонки); $\mu = \Delta \varphi/\varphi_0$ - относительное изменение доли теплого воздуха в суммарном потоке.

После нормирования и приведения сигналов всех элементов, а также последующего перехода к передаточным функциям (ПФ), структурная схема САУ температуры может быть представлена (см. рис. 2) в виде, близком к приведенному в [8-11]. На рис. 2 обозначено: Р - регулятор температуры, описываемый ПФ $W_p(p)$, ИМ - исполнительный механизм, описываемый ПФ апериодического звена первого порядка с постоянной времени $T_{\text{им}}$ и коэффициентом передачи $k_{\text{им}}$, УО - управляющий орган, с коэффициентом передачи $k_{\text{УО}}$, ОУ - объект управления, описываемый ПФ апериодического звена первого порядка с постоянной времени $T_{\text{ОУ}}$ и коэффициентом передачи $k_{\text{ОУ}}$; $t_{\text{Зад}}$, $t_{\text{Вых}}$, $f(\tau)$ - соответственно, заданная и выходная температуры каюты, а также приведенное к ходу УО результирующее возмущение.

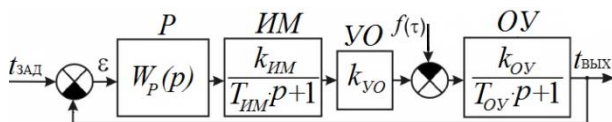


Рис. 2. Структурная схема САУ температуры воздуха в каюте

Предварительно, для определения основных коэффициентов структурной схемы САУ температуры воздуха, проведен расчет теплопритоков для типовой одноместной каюты 2,5×1,5×2,2 м с одной внешней стенкой и одним иллюминатором. При расчете коэффициентов САУ учтены различные конструктивные параметры каюты (площади поверхностей, удельная плотность материалов ограждений и другие), а также теплофизические параметры воздуха (влажность, относительная влажность, давление насыщенных водяных паров, вязкость и другие). Для режима охлаждения каюты приняты следующие значения: $t_c = 29^\circ\text{C}$ температура воздуха в соседних помещениях и коридоре; $M = 9,57\text{ кг}$ - масса воздуха в каюте; $G_c = 0,0656\text{ кг/с}$ - расход приточного воздуха при условии одновременного выделения в каюте тепла и влаги; удельная теплоемкость воздуха $1005\text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$; наружная температура воздуха $+34^\circ\text{C}$, требуемая в каюте температура воздуха $+27^\circ\text{C}$. Использование методик [8-11] позволило установить следующие коэффициенты структурной схемы САУ: $T_{IM} = 0,8\text{ с}$, $k_{IM} = 1,8\text{ В/В}$, $k_{YO} = 0,025\text{ м/В}$; $T_{OY} = 110\text{ с}$; $k_{OY} = 3,3\text{ град/м}$; $t_{зАд} = 27^\circ\text{C}$.

Регулятор температуры P настроен на симметричный оптимум, описывается ПФ пропорционально-интегрального закона:

$$W_P(p) = k_P + 1/(p \cdot T_P), \quad (6)$$

где $k_P = 7\text{ В/град}$, $T_P = 10\text{ с}$.

Результат моделирования, основанный на использовании методик [8, 13-15], процесса стабилизации температуры воздуха в каюте, при указанных выше параметрах объекта управления, коэффициентах и настройках ПИ-регулятора, приведен на рис. 3, граф. 1. Из рисунка видно, что примерно через 2,5 минуты температура в каюте установилась на практически заданном уровне ($+27^\circ\text{C}$), а ее максимальное динамическое отклонение не превысило $0,6^\circ\text{C}$. Такой результат можно считать вполне удовлетворительным. Однако следует отметить, что: а) в ходе нормального функционирования САУ температуры параметры ПФ ОУ не остаются постоянными; б) регулятор ПИ-типа имеет фиксированные настройки и не учитывает изменения свойств ОУ при изменениях условий окружающей среды и тепловых нагрузок, давления конденсации. Например, в таблице приведены изменения теплофизических свойств воздуха при изменении его температуры в относительно небольших пределах (от 10 до 40°C).

Таблица

Изменения теплофизических свойств воздуха в кондиционируемой каюте

Параметр	Температура воздуха	
	10°C	40°C
Плотность, ρ , кг/м^3	1,247	1,128
Динамическая вязкость, $\mu \cdot 10^6$, $\text{Па}\cdot\text{с}$	17,6	19,1
Кинематическая вязкость, $\nu \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$	14,16	16,96
Теплопроводность, $\lambda \cdot 10^2$, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$	2,51	2,76
Температуропроводность, $a \cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{с}$	20	24,3
Число Прандтля, Pr	0,705	0,699

Очевидно, что совокупное изменение параметров ОУ (от изменения параметров воздуха (табл. 1), тепловых нагрузок, давления конденсации и других) будет существенно влиять на результирующие динамические свойства САУ при неизменных настройках ПИ-регулятора температуры. Анализ выражений (2), (3), а также источников [2, 3, 9-11], позволяет утверждать, что постоянная времени T_P коэффициент передачи k_P могут изменяться на $\pm 20\%$. На рис. 3, граф. 2, показаны результаты моделирования процесса стабилизации температуры воздуха в каюте при $k_{OY} = 0,8\text{ град/м}$ и $T_{OY} = 1,2\cdot 110\text{ с}$, а граф. 3 иллюстрирует этот же процесс, но при $k_{OY} = 1,2\text{ град/м}$ и $T_{OY} = 0,8\cdot 110\text{ с}$. Приведенные графики показывают существенные отклонения динамических режимов от желаемых.

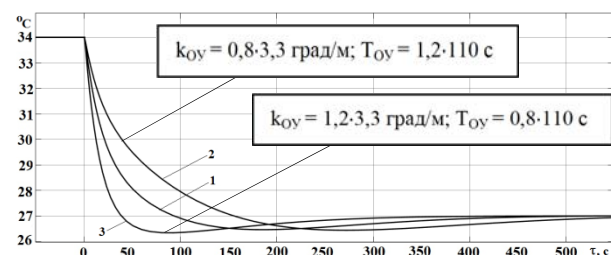


Рис. 3. Динамические процессы стабилизации температуры воздуха в каюте с применением в САУ ПИ-регулятора с фиксированными настройками при различных параметрах ПФ ОУ

Известны различные способы управления объектами с переменными параметрами (адаптивные регуляторы с сигнальной и/или параметрической самонастройкой, системы с эталонной моделью, с наблюдателями состояния и другие). Следует отметить, что для многих прикладных задач применение классических методов теории робастного и адаптивного управления не всегда рационально, поскольку предполагает существенное усложнение САУ за счет перехода к управлению с идентификацией переменных объекта в реальном времени (с помощью наблюдателей состояния). Хорошо известны и достаточно распространены методы управления объектами с переменными параметрами и параметрами, не имеющими однозначного аналитического описания, либо имеющими крайне сложное математическое описание. Эти методы основаны на применении нечетких (фаззи) регуляторов [16-19] и,

в настоящее время, имеют хорошую программно-аппаратную поддержку.

Так, для рассматриваемой САУ температуры диапазоны вариации параметров ОУ и нагрузок, в целом, известны и обуславливают ухудшение показателей качества только динамических процессов. При таких условиях задача обеспечения грубости системы узка и может быть решена без применения эталонных моделей и наблюдателей состояния – путем формирования нелинейных характеристик регуляторов. Если принять, что характеристики регуляторов функционально зависят от амплитуды и скорости изменения ошибки регулирования, то можно перейти к системам с нечетким управлением [16-19].

Известно, что нечеткое управление обладает определенными свойствами грубости [16, 19], а объединение нескольких нечетких регуляторов (НР) позволяет получение хороших динамических свойств системы, причем небольшое число правил НР придает улучшенные свойства обобщения. Следует отметить, что с целью обеспечения совместимости различного оборудования, техническая реализация НР должна соответствовать стандарту МЭК IEC 61131-7 (Part 7. Fuzzy logic standartization). Этот стандарт вводит ограниченные законы описания элементов нечеткого управления на языках программирования контроллеров, зафиксированных IEC61131-3. Для аналоговых объектов управления, это, например, язык *Function Block Diagram (FBD)*. Стандартом определяются модель и функциональные элементы НР: размытие (*fuzzification*), обратное уплотнение (*defuzzification*), производящие правила по алгоритму последовательных операций объединения (*aggregation*), активации (*activation*), накопления (*accumulation*), определяются команды родового языка *Fuzzy Control Language (FCL)* для разработки нечетких систем управления. Выполнение требований стандарта IEC61131-7 резко ограничивает весьма разнообразные, теоретически возможные, решения по созданию НР, тем самым заметно упрощая задачу технической реализации и совместимости конкретного НР.

Для рассматриваемой в статье САУ предлагается применить такой НР [18], построение которого не требует привлечения экспертов, формирующих правила фаззификации, формирования и настройки правил объединения, активации, дефаззификации (рис. 4). Представляемый НР, по сути: а) является универсальным [18], поскольку предлагает применять однозначную систему логического вывода; б) может применяться во многих технических решениях; в) в своем алгоритме использует, как общепринято, производную от сигнала ошибки.

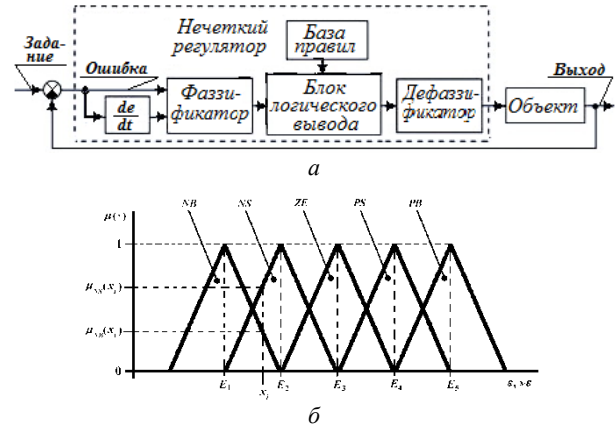


Рис. 4. Нечеткая система управления (а) и пример (б) процедуры фаззификации (5 термов) входных переменных

Рассмотрим двухканальный регулятор (см. рис. 5), содержащий два нечетких регулятора с одинаковой структурой – F1 и F2, выходные сигналы которых суммируются:

$$y(p) = y_1(p) + y_2(p). \quad (7)$$

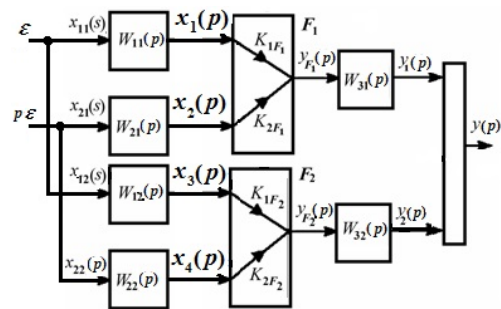


Рис. 5. Структура универсального нечеткого регулятора

Пусть ПФ $W_{11}(p)$, $W_{21}(p)$ и $W_{12}(p)$, $W_{22}(p)$ входных сигналов – масштабирующие, пропорциональные звенья; входных сигналов два – $x_{11}(p) = x_{12}(p)$ и $x_{21}(p) = x_{22}(p)$, причем первый из них является ошибкой регулирования $\varepsilon(p)$, а второй – производной $p \cdot \varepsilon(p) \Rightarrow d\varepsilon(\tau)/d\tau$ от ошибки; ПФ $W_{31}(p)$ первого НР осуществляет пропорциональное усиление, а второго НР $W_{32}(p)$ – операцию интегрирования с постоянной времени T_{ii} ; нелинейные коэффициенты передачи K_{1F1} , K_{2F1} и K_{1F2} , K_{2F2} нечетких регуляторов по каждому из термов $x_1(p)$, ..., $x_4(p)$ линеаризованы.

При этих условиях можно записать:

$$\left. \begin{aligned} W_{11}(p) &= k_{D1}; W_{21}(p) = k_{D1}; W_{12}(p) = k_{I2}; \\ W_{22}(p) &= k_{D2}; \varepsilon(\tau) \Rightarrow \varepsilon(p) = x_{11}(p) = x_{12}(p); \\ d\varepsilon(\tau)/d\tau &\Rightarrow p \cdot \varepsilon(p) = x_{21}(p) = x_{22}(p); \\ K_{1F1} &= \frac{\partial F_1(\tau)}{\partial x_1(\tau)}; K_{2F1} = \frac{\partial F_1(\tau)}{\partial x_2(\tau)}; \\ K_{1F2} &= \frac{\partial F_2(\tau)}{\partial x_3(\tau)}; K_{2F2} = \frac{\partial F_2(\tau)}{\partial x_4(\tau)}; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$W_{31}(p) = k_n; W_{32}(p) = \frac{1}{p \cdot T_u}.$$

Из (8), согласно рис. 5, получим

$$\left. \begin{aligned} y_1(p) &= \varepsilon(p) \cdot k_{П1} \cdot K_{1F1} \cdot k_{П1} + s \cdot \varepsilon(p) \cdot k_{Д1} \cdot K_{2F1} \cdot k_{П1}; \\ y_2(p) &= \varepsilon(p) \cdot k_{П2} \cdot K_{1F2} \cdot \frac{1}{p \cdot T_u} + \\ &+ \varepsilon(p) \cdot k_{Д2} \cdot K_{2F2} \cdot \frac{1}{T_u}; \\ y(p) &= y_1(p) + y_2(p), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

откуда ПФ НР по ошибке

$$W_{НР}(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = k_{П1} \cdot K_{1F1} \cdot k_{П1} + k_{Д2} \cdot K_{2F2} \cdot \frac{1}{T_u} + k_{П2} \cdot K_{1F2} \cdot \frac{1}{p \cdot T_u} + p \cdot k_{Д1} \cdot K_{2F1} \cdot k_{П1}, \quad (10)$$

соответствует ПФ идеального ПИД-регулятора:

$$W_{НР}(p) = K_{нНР} + \frac{1}{p \cdot T_{uНР}} + p \cdot T_{дНР}, \quad (11)$$

$$\text{где } K_{нНР} = k_{П1} \cdot K_{1F1} \cdot k_{П1} + k_{Д2} \cdot K_{2F2} \cdot \frac{1}{T_u};$$

$$T_{uНР} = T_u / (k_{П2} \cdot K_{1F2}); T_{дНР} = k_{Д1} \cdot K_{2F1} \cdot k_{П1}.$$

Этапы формирования базы правил и логического вывода формализованы согласно [11, 16, 18, 19] и приведены на рис. 6. Входные сигналы разбиты на пять термов, выходной - на семь.

Этап дефазификации основан на применении известного метода "центра тяжести" [16, 19]. Если установить в каждый из каналов двухканального, реализующего свойства нечеткого ПИД-регулятора (см. рис. 5), два абсолютно одинаковых, с одинаковыми масштабными коэффициентами $k_{П1}$ и $k_{Д1}$ (т.е. $k_{П1} = k_{П2} = k_{П}$ и $k_{Д1} = k_{Д2} = k_{Д}$) НР, то результирующую структурную схему можно упростить (см. рис. 7) и оставить лишь один канал нечеткой обработки, объединив одним каналом этапы фаззификации, логического вывода и дефазификации.

		$\mu(x_1)$				
		E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
$\mu(x_2)$	E_5	NB	NS	ZE	PS	PB
	E_4	ZE	PS	PB	PBS	PBS
	E_3	PS	NS	ZE	PS	PB
	E_2	ZE	NB	NS	ZE	PS
	E_1	NS	NBS	NBS	NB	NS
		$\mu(y)$				

Рис. 6. Формирование базы правил и логического вывода НР

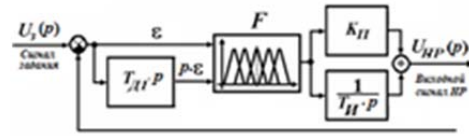


Рис. 7. Участок структурной схемы универсального нечеткого ПИД-регулятора

Для рассматриваемой САУ СККВ каюты с НР, принимаем прежние значения k_p и T_p , т.е. $k_{П1} = k_p = 7$ В/град, $T_{И1} = T_p = 10$ с. Дифференциальную составляющую вычисляем приближенно, с фильтрацией, согласно ПФ:

$$T_{Д1} \cdot p \approx \frac{T_{Д1} \cdot p}{0,1 T_{Д1} \cdot p}, \quad (12)$$

где $T_{Д1} = 1$ с.

На рис. 8 приведены результаты моделирования процесса стабилизации температуры воздуха в кондиционируемой каюте с САУ, содержащей НР, который построен согласно схеме, приведенной на рис. 7 и по изложенной выше методике.

Графики 1, 2 и 3, приведенные на рис. 8, соответствуют отклонениям ПФ ОУ на $\pm 20\%$, как и для предыдущей (см. рис. 3) процедуры моделирования САУ с классическим ПИ-регулятором.

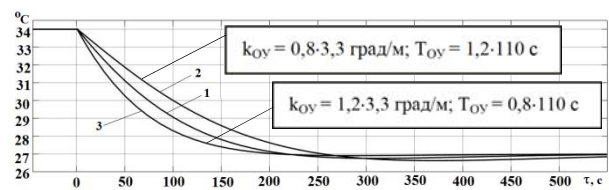


Рис. 8. Динамические процессы стабилизации температуры воздуха в каюте с применением в САУ нечеткого регулятора при различных параметрах ПФ ОУ

Полученные в результате моделирования графики процесса стабилизации температуры каюты в СККВ с НР позволяют сформировать следующее заключение.

Результаты исследования. На основе анализа принципов функционирования традиционной системы управления комфортным кондиционированием каюты морского судна с ПИ-регулятором температуры воздуха, установлено, что такая система, при изменениях тепловых нагрузок и теплофизических свойств воздуха, не удовлетворяет требованиям к динамическим режимам стабилизации температуры воздуха.

В традиционной системе с ПИ-регулятором температуры, в зависимости от изменения условий окружающей среды, наблюдается либо заметное увеличение перерегулирования (граф. 3, рис. 3), либо затягивание времени переходного процесса (граф. 2, рис. 3).

Предложена САУ СККВ в каюте с нечетким регулятором температуры воздуха. Для такого нечеткого регулятора приведена методика его синтеза,

характеризуються простотою формування логічного вивода (рис. 6) і упрощенням структури регулятора (рис. 7).

Математическое моделирование (рис. 8) процессов стабилизации температуры воздуха в каюте с САУ, содержащей НР, показало: а) заметное улучшение динамических процессов стабилизации температуры воздуха; б) свойства робастности САУ к изменениям параметров ПФ объекта управления, связанные с изменениями параметров окружающей среды.

Анализ результатов моделирования позволяет утверждать, что использование в различных помещениях морских и речных судов предложенной системы управления с нечетким регулятором в СККВ позволит улучшить условия обитаемости членов экипажа и пассажиров.

Л и т е р а т у р а

- Голиков В. А. Научные основы управления микроклиматом судна / В. А. Голиков. – Одесса: ОГМА, 1990. – 321 с.
- Series: Modern refrigeration and air conditioning / Publisher: Goodheart-Willcox; 18 edition. – 2004, p.p. 1211. ISBN-13: 978-1590702802.
- Загоруйко В. А. Судовая холодильная техника / В. А. Загоруйко, А. А. Голиков. – Київ: Наукова думка, 2000. – 608 с.
- Лалаев Г. Г. Судовые холодильные установки и системы кондиционирования / Г. Г. Лалаев. – М.: Транспорт, 1981. – 248 с.
- Ghiaus C. Calculation of optimal thermal load of intermittently heated buildings / C. Ghiaus, I. Hazyuk // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42, № 8. – P. 1248-1258. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.02.017.
- Wang J. Analytical design of decoupling control for variable-air-volume air-conditioning system / J. Wang, C. Zhang, Y. Jing // In *Proceedings of the IEEE Conf. on Digital Object Identifier*. – 2008. – P. 630-635. doi: 10.1109/ICCIS.2008.4670836.
- Mendes N. A new mathematical method to solve highly coupled equations of heat and mass transfer in porous media / N. Mendes, P. C. Philippi, R. Lamberts // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2001. – Vol. 45, № 3. – P. 509-518. doi:10.1016/S0017-9310(01)00172-7.
- Василец Д. И. Анализ методов моделирования систем кондиционирования судовых помещений / Д. И. Василец, Н. А. Козьминых, О. А. Онищенко // *Вестник НТУ "ХПИ"*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 7(1229). – С. 24-29. doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.04.
- Василец Д. И. Использование метода электротепловых аналогий при моделировании процессов в судовой холодильной установке / Д. И. Василец, Н. А. Козьминых, Г. В. Налева, О. А. Онищенко // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2018. Том 1, № 3(41). – С. 214-221.
- Букарос А. Структурная модель судовой холодильной установки / А. Ю. Букарос, О. А. Онищенко, Н. А. Козьминых, Д. В. Василец, В. Н. Букарос // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2018. Том 4, № 42. – С. 229-235.
- Кондратенко Ю. П. Синтез та аналіз властивостей нечітких регуляторів для стабілізації температури в суд-

новых приміщеннях / Ю. П. Кондратенко, Г. В. Кондратенко, Т. Л. Мельник // *Автоматизация судовых технических средств*. – 2007. – Вып. 12. – Одесса: ОНМА. – С. 53-67.

- Methods of robust, Neuro-Fuzzy and adaptive control: a tutorial / Edited by N.D. Yegupova. – Moscow: Publishing MSTU Bauman, 2002. – 744 p.
- Orosa J. A. A new modelling methodology to control HVAC systems / J. A. Orosa // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – Vol. 38, № 4. – P. 4505-4513. doi:10.1016/j.eswa.2010.09.124.
- Wang X. Modelling and experiment analysis of variable refrigerant flow air-conditioning systems / X. Wang, J. Xia, X. Zhang, S. Shiochi, C. Peng, Y. Jiang // In *Proceedings of the IBPSA Conf. on Building Simulation*. – 2009. – P. 361-368. http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2009/bs09_0361_368.pdf.
- Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
- Живица Ю. В. Управление промышленной холодильной установкой с использованием алгоритмов нечеткой логики / Ю. В. Живица, О. А. Онищенко // *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. – 2008. – Вып. 4(51). Ч. 2. – С. 140-143.
- Онищенко О. А. Универсальный нечеткий регулятор / О. А. Онищенко // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2012. – № 07(83). – С. 49-52.
- Новак В. Математические принципы нечеткой логики / В. Новак, И. Перфильева, И. Мочкорж / Пер. с англ. под ред. А. Н. Аверкина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 352 с.

R e f e r e n c e s

- Golikov V. A. Nauchnye osnovy upravleniya mikroklimatom sudna / V. A. Golikov – Odessa: OGMA, 1990. – 321 s.
- Series: Modern refrigeration and air conditioning / Publisher: Goodheart-Willcox; 18 edition. – 2004, p.p. 1211. ISBN-13: 978-1590702802.
- Zagorujko V. A. Sudovaya holodilnaya tehnika / V. A. Zagorujko, A. A. Golikov. – Kiyiv: Naukova dumka, 2000. – 608 s.
- Lalaev G. G. Sudovye holodilnye ustanovki i sistemy kondicionirovaniya / G. G. Lalaev. – M.: Transport, 1981. – 248 s.
- Ghiaus C. Calculation of optimal thermal load of intermittently heated buildings / C. Ghiaus, I. Hazyuk // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42, № 8. – P. 1248-1258. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.02.017.
- Wang J. Analytical design of decoupling control for variable-air-volume air-conditioning system / J. Wang, C. Zhang, Y. Jing // In *Proceedings of the IEEE Conf. on Digital Object Identifier*. – 2008. – P. 630-635. doi: 10.1109/ICCIS.2008.4670836.
- Mendes N. A new mathematical method to solve highly coupled equations of heat and mass transfer in porous media / N. Mendes, P. C. Philippi, R. Lamberts // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2001. – Vol. 45, № 3. – P. 509-518. doi:10.1016/S0017-9310(01)00172-7.
- Vasilec D. I. Analiz metodov modelirovaniya sistem kondicionirovaniya sudovyh pomeshenij / D. I. Vasilec, N. A. Kozminyh, O. A. Onishchenko // *Vestnik NTU "HPI"*, Seriya : Novey resheniya v sovremennyh tehnologiyah. – Harkov: NTU "HPI". – 2017. – № 7(1229). – S. 24-29. doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.04.

9. Vasilec D. I. Ispolzovanie metoda elektrote-plovykh analogiy pri modelirovanii processov v sudovoy holodilnoy ustanovke. / D. I. Vasilec, N. A. Kozminykh, G. V. Naleva, O. A. Onishchenko // Morskie intellektualnye tehnologii. – 2018. Tom 1, № 3(41). – S. 214-221.
10. Bukaros A. Strukturnaya model sudovoy holodilnoy ustanovki / A. Yu. Bukaros, O. A. Onishchenko, N. A. Kozminykh, D. V. Vasilec, V. N. Bukaros. // Morskie intellektualnye tehnologii. – 2018. Tom 4, № 42. – S. 229-235.
11. Kondratenko Yu. P. Sintez ta analiz vlastivostey nechitkih regulyatoriv dlya stabilizatsiyi temperaturi v sudnovih primishennyah / Yu. P. Kondratenko, G. V. Kondratenko, T. L. Melnik // Avtomatizatsiya sudovykh tehnikeskikh sredstv. – 2007. – Vyp. 12. – Odessa: ONMA. – S. 53-67.
12. Methods of robust, Neuro-Fuzzy and adaptive control: a tutorial / Edited by N. D. Yegupova. – Moscow: Publishing MSTU Bauman, 2002. – 744 p.
13. Orosa J. A. A new modelling methodology to control HVAC systems / J. A. Orosa // Expert Systems with Applications. – 2011. – Vol. 38, № 4. – P. 4505-4513. doi:10.1016/j.eswa.2010.09.124.
14. Wang X. Modelling and experiment analysis of variable refrigerant flow air-conditioning systems / X. Wang, J. Xia, X. Zhang, S. Shiochi, C. Peng, Y. Jiang // In Proceedings of the IBPSA Conf. on Building Simulation. – 2009. – P. 361-368. http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2009/bs09_0361_368.pdf.
15. Leonenkov A. V. Nечetkoe modelirovanie v sre-de MATLAB i fuzzyTECH. – Spb.: BHV-Peterburg, 2003. – 736 s.
16. Zhivica Yu. Upravlenie promyshlennoj holo-dilnoj ustanovkoj s ispolzovaniem algoritmov nechetkoj logiki / Yu. V. Zhivica, O. A. Onishchenko // Visnik KDPU im. M. Ostrogradskogo. – 2008. – Vip. 4(51). Ch. 2. – S. 140-143.
17. Onishchenko O. A. Universalnyj nechetkij regu-lyator / O. A. Onishchenko // Elektrotehnichni ta komp'yuterni sistemi. – 2012. – № 07(83). – S. 49-52.
18. Novak V. Matematicheskie principy nechetkoj logiki / V. Novak, I. Perfilova, I. Mochkorzh / Per. s angl. pod red. Averkina A. N. – M.: FIZMATLIT, 2006. – 352 s.

Василюк Д. І., Козьмійних М. А., Налева Г. В., Оніщенко О. А. Система стабілізації температури повітря у суднових кондиціонованих приміщеннях.

Описана роботу традиційної системи стабілізації температури повітря у кондиціонованій каюті морського судна з пропорційно-інтегральним регулятором у контурі управління. Показано, що існуючі системи конди-

ціонування повітря при змінах теплових навантажень не задовольняють вимогам до динамічних режимів стабілізації температури. Наведена структурна схема системи стабілізації з нечітким ПІД-регулятором, що відрізняється простим принципом фазифікації і логічного висновку. Методами моделювання показано, що запропонована система забезпечує високу якість процесів стабілізації температури повітря і має властивості робастності.

Ключові слова: нечіткий регулятор, двоканална система, кондиціонер, динаміка, фаззи.

Vasilets D. I., Kozminykh N. A., Naleva G. V., Onishchenko O. A. Stabilization system for air temperature in a ship air-conditioned room.

The operation of the traditional system for stabilizing the air temperature in an air-conditioned cabin of a sea vessel is described. The system uses a proportional-integral controller in the control loop. It is proved that the existing air conditioning systems are significantly affected by thermal loads and variable air parameters. Existing air conditioning systems do not work satisfactorily under changes in heat loads. In such systems, poor dynamics. There is either overshoot or delayed process. The structure of the stabilization system with a fuzzy PID controller is proposed. Such a system is distinguished by the simple principle of fuzzification and logical inference. Using mathematical modeling methods, it is proved that a new system with a fuzzy controller functions better. The new system provides high quality stabilization processes for air temperature and is robustness properties.

Keywords: fuzzy controller, two-channel system, air conditioning, dynamics, fuzzy.

Василюк Д. І. – асистент кафедри суднових допоміжних і холодильних установок, Національний університет "Одеська морська академія", e-mail: vasilets@gmail.com.

Козьмійних М. А. – к.т.н., доцент, зав. кафедри суднових допоміжних і холодильних установок, Національний університет "Одеська морська академія", e-mail: trunonma@gmail.com.

Налева Г. В. – к.т.н., доцент, доцент кафедри вищої математики, Національний університет "Одеська морська академія", e-mail: nalevagv@gmail.com.

Оніщенко О. А. – д.т.н., професор, професор кафедри технічної експлуатації флоту, Національний університет "Одеська морська академія", e-mail: oleganton@gmail.com.

Стаття подана: 06.08.2019.